

Е. И. КАЗАНЦЕВ

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ
ПЕЧИ**

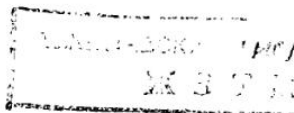
Е. И. КАЗАНЦЕВ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ

*Справочное руководство
для расчетов
и проектирования*

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ
ДОПОЛНЕННОЕ И ПЕРЕРАБОТАННОЕ

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
металлургических специальностей вузов*



Казанцев



МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ» 1975

УДК 669.041.(075.8)

Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е издание, дополненное и переработанное, Казанцев Е. И. М., «Металлургия», 1975. 368 с.

Приведены характеристики теплофизических свойств газов, жидкостей, металлов и твердых веществ, применяемых в черной и цветной металлургии, коксохимии и других отраслях промышленности, изложены сведения, необходимые при расчетах печей различных типов, о разных топливах и их сжигании, механике газов, передаче тепла, нагреве и охлаждении тел, материалах печей и пр.

Справочник предназначен в качестве учебного пособия для студентов металлургических, энергетических и машиностроительных вузов и инженерно-технических работников предприятий, проектно-конструкторских организаций и научно-исследовательских институтов, работающих в области газопечной теплотехники. Ил. 204. Табл. 194. Список лит.: 17 назв.

© Издательство «Металлургия», 1975

31011*—176
К $\frac{\quad}{040(01)—75}$ 143—75

* Книга имеет второй книго-торговый индекс — 30304.

I ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	6
<i>Раздел первый</i>	
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ	
Глава I. Теплофизические свойства газов	10
Глава II. Теплофизические свойства жидкостей	32
Глава III. Теплофизические свойства веществ, металлов и их сплавов	44
Глава IV. Теплофизические свойства сталей и чугунов	61
Классификация сталей	61
Обозначения марок сталей	62
Теплопроводность сталей	64
Расчетный метод определения теплопроводности сталей	67
Теплофизические свойства сталей по данным различных исследований	70
1. Углеродистые стали	71
2. Низколегированные стали	78
3. Хромистые нержавеющие стали	88
4. Хромоникелевые аустенитные стали	95
5. Высоколегированные стали	102
6. Стали для отливок	107
7. Чугуны	107
Глава V. Механические свойства сталей и сплавов	111
Глава VI. Теплофизические свойства технических и огнеупорных материалов и огнеупорных изделий	117
Технические материалы	117
Классификация огнеупорных изделий	127
Маркировка огнеупорных изделий	130
Свойства огнеупорных изделий	131
Теплоизоляционные материалы	149
<i>Раздел второй</i>	
ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ	
Глава VII. Физико-химические свойства топлива	157
Газообразные топлива	157
Технические условия на «сжатые газы» (по ГОСТ 6763—53)	171
Технические условия на сжиженный углеродородный топливный газ (по ГОСТ 10196—62)	171
Жидкие топлива	172
Твердые топлива	179
Качества ископаемых углей и горючих сланцев СССР	179
Кокс	181
Глава VIII. Сжигание топлива	187
Теплота сгорания топлива	187
Температуры при сжигании топлив	189
Количество воздуха и дыма	194

Сравнительные характеристики	196
Коэффициент использования топлива	202

Раздел третий

МЕХАНИКА ГАЗОВ

Глава IX. Давления и напоры	209
Основные понятия и законы	209
Потери давления	213
Потери на трение	214
Коэффициент трения при ламинарном режиме ($Re \leq 2000$)	214
Коэффициент трения при турбулентном режиме	215
Потери на местное сопротивление	216
1. Изменение направления потока	218
2. Изменение скорости потока	222
3. Выход потока из канала	228
4. Вход потока в канал	230
5. Слияние и разделение потоков	235
6. Сыпучие материалы	239
7. Течение газо-жидкостной смеси	242
8. Некоторые частные случаи	243
Глава X. Оборудование для создания давлений и разрежений	245
Оборудование для нагнетания газов	245
Оборудование для создания тяги	245
Глава XI. Струйное течение газов	254
Истечение газов при низком давлении	254
Истечение газов при высоком давлении	254
Истечение газов через сопло Лаваля	257
Аэродинамика струи	259
Струйные аппараты	261
Факел пламени	264
Факел предварительно перемешанной газоз- воздушной смеси	269
Опытные данные	275

Раздел четвертый

**ТЕПЛОПЕРЕДАЧА
И НАГРЕВ ИЗДЕЛИЙ**

Глава XII. Теплопередача	278
Теплопередача посредством теплопроводности при стационарном режиме	278
Теплопередача через плоскую многослой- ную стенку	278
Теплопередача через цилиндрическую стенку	278
Теплопередача через оребренную поверх- ность	279
Теплоотдача конвекцией	279
Теплоотдача при свободной конвекции	279
Теплоотдача при вынужденном движении жидкости	281
Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния	284
Передача тепла излучением	285
Основные понятия и законы	285
Свойства лучистых потоков	295

Теплообмен посредством излучения между двумя абсолютно черными телами, произвольно расположенными в пространстве	296
Теплообмен излучением между серыми телами	305
Теплообмен при наличии экранов	305
Излучение через отверстия	306
Излучение газов и паров	306
Теплообмен между серыми телами в замкнутом пространстве, заполненном лучепоглощающей средой	311
Коэффициент теплоотдачи излучением	313
Коэффициент теплопередачи	314
Глава XIII. Нагрев и охлаждение тел	315
Методы расчетов нагрева и охлаждения изделий	315
Нагрев тонких изделий	318
Нагрев тонких изделий в печи с постоянной температурой	318
Нагрев тонких изделий в печи с переменной температурой	319
Нагрев массивных изделий	319
Методы расчетов нагрева, основанные на решении основного дифференциального уравнения теплопроводности	319
Поверхностные условия I рода	320
Поверхностные условия II рода	326
Поверхностные условия III рода	328
Метод тепловой диаграммы	340
Расчет по методу «тонких» изделий с поправкой на массивность	340
Метод регулярного режима при условии нагрева $t_n = \text{const}$	341
Нагрев горячих слитков	343
Нагрев неподвижного слоя материалов	345
Нагрев заготовок на монолитном поду методических печей	349
Технология нагрева стали	350
Температурные напряжения при нагреве	353
Окисление стали при нагреве	355
Список литературы	359
Приложение 1. Перевод некоторых величин из прежних систем в международную систему единиц СИ	364
Приложение 2. Переводные множители для перехода от некоторых английских и американских единиц к единицам системы СИ	366

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Со времени выхода в свет I издания книги «Промышленные печи» прошло 10 лет. За это время в учебный процесс высших учебных заведений страны прочно вошла международная система единиц СИ. В связи с этим материал справочника, относящийся к величинам удельных теплоемкостей, коэффициентов теплопроводности, давлений, коэффициентов вязкости и пр., пересчитан и перечерчен. Часть диаграмм имеет справа шкалу в ранее применявшейся системе единиц.

Вновь написаны подразделы по расчету факела пламени, окислению сталей при нагреве, нагреву слоя материалов и др.; введены новые и дополнительные данные в некоторые таблицы и графики.

Из справочника удалены материалы, относящиеся к данным о твердом топливе, о контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуре, о нормах технологического проектирования, что обусловлено ограничением объема книги.

Автор благодарен принимавшим участие в рецензировании книги сотрудникам кафедр теории и автоматизации металлургических печей: Московского института стали и сплавов (заведующий кафедрой профессор М. А. Глинков), Днепропетровского металлургического института (заведующий кафедрой проф. Н. Ю. Тайц) и Уральского политехнического института (заведующий кафедрой профессор Китаев Б. И.), а также рецензенту 2-го издания доценту УПИ А. С. Телегину.

Автор не может не вспомнить добрым словом рецензента 1-го издания книги профессора ДМетИ И. Д. Семикина.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Основные понятия и обозначения

$a = \lambda/\rho c$ — коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле, $\text{м}^2/\text{с}$, L^2T^{-1} ;

$C = cG$ — теплоемкость, представляющая собой отношение количества тепла, требуемого для повышения температуры массы G кг вещества на 1°C , к расходу тепла на повышение температуры такого же массового количества воды с $14,5$ до $15,5^\circ\text{C}$; $\text{Дж}/^\circ\text{C}$; $L^2MT^{-2}\theta^{-1}$;

c — удельная теплоемкость — теплоемкость 1 кг вещества, измеренная при постоянном давлении (c_p) или постоянном объеме (c_v), при его нагреве на 1° , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; $L^2T^{-2}\theta^{-1}$. Отношение $c_p/c_v = k$, где k — показатель адиабаты;

$C_{\text{и}} = dQ/dt$ — истинная теплоемкость, характеризующая тепловую энергию данной системы при вполне определенной температуре;

$c_{\text{ср}} = \frac{Q}{t_2 - t_1} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c \cdot dt$ — средняя теплоемкость, представляющая собой изменение количества тепла в некотором интервале температур ($t_2 - t_1$);

c_m — молярная теплоемкость. Для твердых веществ $c_m = cM$, где M — молекулярная масса вещества; для газов $c_m = c \cdot 22,4$, где $22,4$ — объем моля при нормальных условиях (0°C , 101325 Н/м^2), $\text{кДж}/(\text{моль}\cdot^\circ\text{C})$;

E — модуль Юнга продольной упругости, Н/м^2 ; $L^{-1}MT^{-2}$;

HV — твердость по Бринеллю, Н/м^2 ; $L^{-1}MT^{-2}$;

i — удельная энтальпия (теплосодержание) — количество тепла Q , потребное для нагревания при постоянном давлении массы вещества в 1 кг или его объема в 1 м^3 от 0 до $t^\circ\text{C}$;

$$i = c_{\text{ср}} t; \quad i = \int_0^t c \cdot dt.$$

Приращение энтальпии

$$\Delta i = i_2 - i_1 = c_0^2 t_2 - c_0^1 t_1 = \int_{t_1}^{t_2} c \cdot dt, \quad \text{кДж/кг, кДж/м}^3;$$

$$L^2T^{-2}; L^{-1}MT^{-2};$$

k — удельная электропроводность; $k = \frac{1}{\rho} \quad 1/(\text{Ом}\cdot\text{м})$;

$$L^{-3}M^{-1}T^3 I^2;$$

k — показатель адиабаты, $k = c_p/c_v$;

M — молекулярная масса вещества, кг/моль ;

P — давление, Н/м^2 ; $L^{-1}MT^{-2}$;

$Pr = \nu/a$ — критерий Прандтля, характеризует механизм и способность распространения тепла в жидкой и газообразной средах и является мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке. При $Pr = 1$ и градиенте давления $\text{grad } P = 0$ поля температур и скоростей в потоках подобны;

$Q_{\text{пл}}$ — теплота плавления, кДж/кг; L^2T^{-2} ;

$r_{\text{H}_2\text{O}}$ — влажность дымовых газов, парциальное давление водяных паров в продуктах сгорания;

s — удельная энтропия, кДж/(кг·°C); $L^2T^{-2}\theta^{-1}$;

T, t — температура вещества — мера, определяющая степень нагретости, которая представляет собой среднюю кинетическую энергию атомов или молекул данного вещества. Измеряется в градусах Кельвина (К) или в градусах Цельсия (°C); t — температура по шкале Цельсия (°C); T — температура по термодинамической шкале температур Кельвина, $T = t + 273,16$, К; θ ;

$t_{\text{кип}}$ — температура кипения;

$t_{\text{пл}}$ — температура плавления;

V — объем вещества, м³; L^3 ;

ν — удельный объем, т. е. объем, приходящийся на единицу массы вещества, м³/кг; L^3M^{-1} ;

W — влажность массовая, %;

x — степень сухости пара, $x = 0 \div 1$;

α — коэффициент повышения давления среды при постоянном объеме, определяется по формуле

$$\alpha = \frac{P_t - P_0}{P_0 t}, \quad 1/^\circ\text{C}; \quad \theta^{-1};$$

$\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент линейного расширения, %;

β — коэффициент линейного расширения, характеризует изменение линейных размеров твердых тел при изменении их температуры, 1/°C или м/(м·°C). Значения α и β зависят от начального давления газа. Если газ точно подчиняется закону Бойля—Мариотта, то $\alpha = \beta$;

β — коэффициент объемного расширения вещества, отражающий способность вещества изменять объем при изменении температуры на 1 град; при постоянном давлении определяется по формуле

$$\beta = \frac{v_t - v_0}{v_0 t} \quad 1/^\circ\text{C} \quad \text{или} \quad \text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}); \quad \theta^{-1};$$

δ — относительное удлинение, %;

ε — деформация под нагрузкой, %;

λ — коэффициент теплопроводности, характеризующий способность тел к осуществлению кондуктивной теплопередачи. Численно равен количеству тепла, передаваемому за 1 ч через 1 м² изотермической поверхности (удельному тепловому потоку q) при разности температур в 1 град между ограничивающими поверхностями в теле толщиной 1 м (градиент температуры $\text{grad } t = 1$). При прямолинейном изменении λ в зависимости от температуры определяют по формуле $\lambda_t = \lambda_0 \pm bt$, где λ_0 и λ_t — соответственно коэффициенты теплопроводности при 0°C и температуре t ; b — коэффициент, показывающий изменение λ при изменении t на 1 град, Вт/(м·°C); $LMT^{-3}\theta^{-1}$;

- $\nu = \eta/\rho$ — коэффициент кинематической вязкости, представляет собой отношение вязкости к плотности (объемной массе) данной среды, $\text{м}^2/\text{с}$; L^2T^{-1} ;
- ψ — относительное сужение, %;
- ρ — плотность (объемная масса), масса вещества (кг), занимающая объем в 1 м^3 ($\text{кг}/\text{м}^3$); $L^{-3}M$. Обратная величина плотности $\nu = 1/\rho$ — удельный объем ($\text{м}^3/\text{кг}$), характеризующий объем единицы количества (массы) вещества; L^3M^{-1} ;
- $\rho_{\text{э}}, \rho$ — удельное-электрическое сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{м}$; $L^3MT^{-3}I^{-2}$;
- σ — коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Дж}/\text{м}^2$; MT^{-2} ;
- $\sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{пч}}$ — предел прочности при растяжении, $\text{Н}/\text{м}^2$; $L^{-1}MT^{-2}$;
- $\sigma_{\text{пщ}}$ — предел пропорциональности, $\text{Н}/\text{м}^2$; $L^{-1}MT^{-2}$;
- $\sigma_{\text{т}}$ — предел текучести, $\text{Н}/\text{м}^2$; $L^{-1}MT^{-2}$;
- η — коэффициент вязкости, характеризующий внутреннее трение жидкостей или газов, их способность оказывать сопротивление относительному перемещению своих слоев; представляет собой изменение количества движения объема жидкости, приходящееся на единицу поверхности соприкосновения слоев, $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; $L^{-1}MT^{-1}$.

Индексы:

- кип — параметры вещества при температуре кипения;
- кр — параметры вещества в критическом состоянии;
- 0 — начальные значения параметров; значения параметров при нормальных условиях (0°C ; $101325 \text{ Н}/\text{м}^2$);
- пл — параметры вещества при температуре плавления;
- p — значения параметра при постоянном давлении;
- ср или m — усредненные параметры вещества;
- v — значения параметра при постоянном объеме.

Примечание. В настоящее время в соответствии с системой СИ для измерения давлений введена новая единица — паскаль (Па):

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2;$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Н}/\text{м}^2 = 0,980665 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} \cong 10 \text{ Па} \text{ или } 1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ даПа} \text{ с ошибкой менее } 2\%.$$

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ

Таблица I-1

Основные физические характеристики газов

Название вещества и его химическая формула	Молекулярная масса M	Плотность при нормальных условиях ρ , кг/м ³	Относительная плотность (к воздуху)
Азот (N ₂)	28,016	1,2505	0,9673
Аммиак (NH ₃)	17,031	0,7714	0,6967
Аргон (Ar)	39,944	1,7839	1,3799
Ацетилен (C ₂ H ₂)	26,04	1,1709	0,9057
Ацетон (C ₃ H ₆ O)	58,08	(2,595)	2,005
Н-бутан (C ₄ H ₁₀)	58,12	2,703	2,091
Изо-бутан (C ₄ H ₁₀)	58,12	2,668	2,064
Н-бутиловый спирт (C ₄ H ₁₀ O)	74,12	3,244	2,610
Вода (H ₂ O)	18,016	0,768	0,5941
Водород (H ₂)	2,0156	0,08987	0,06952
Воздух (сухой)	28,96	1,2928	1,000
Н-гексан (C ₆ H ₁₄)	86,17	(3,845)	2,970
Гелий (He)	4,003	0,1785	0,1381
Н-гептан (C ₇ H ₁₆)	100,19	4,459	3,450
Двуокись углерода (CO ₂)	44,01	1,9768	1,5291
Н-декан (C ₁₀ H ₂₂)	142,3	(6,35)	4,91
Дифенил (C ₁₂ H ₁₀)	154,08	(6,89)	5,33
Дифениловый эфир (C ₁₂ H ₁₀ O)	168,8	(7,54)	5,83
Дихлорметан (CH ₂ Cl ₂)	84,94	(3,79)	2,93
Диэтиловый эфир (C ₄ H ₁₀ O)	74,12	(3,30)	2,55
Закись азота (N ₂ O)	44,016	1,9780	1,53
Иодистый водород (HI)	127,93	5,789	4,478
Кислород (O ₂)	32,000	1,42895	1,1033
Криптон (Kr)	83,7	3,74	2,89
Ксенон (Xe)	131,3	5,89	4,51
Метан (CH ₄)	16,04	0,7168	0,5545
Метиламин (CH ₅ N)	31,06	1,388	1,0737

Объем киломоля $\text{м}^3/\text{кмоль}$	Температура, °C			Критическое давление $p_{\text{кр}}, \text{МН/м}^2$	Критическая плотность $\rho_{\text{кр}}, \text{кг/м}^3$
	плавления $t_{\text{пл}}$	кипения $t_{\text{кип}}$	критическая $t_{\text{кр}}$		
22,4	-210,02	-195,81	-147,0	3,391	311
22,08	-77,7	-33,4	132,3	11,27	235
22,39	-189,3	-185,9	-122	4,861	531
22,22	-81*1	-83,6*2	35,7	6,243	231
(22,41)	-94,3	56,1	235,5	4,714	273
21,50	-135	0,5	152,0	3,793	228
21,78	-145	-10,2	134,9	3,646	221
22,84	-89,8	117,7	288	4,959	—
23,45	0,0	100,0	374,15	22,114	307
22,43	-259,2	-252,78	-239,9	1,294	31
22,4	-213	-193	-140,7	3,763	310
(22,41)	-95,3	68,73	234,7	3,028	234
22,42	—	-268,93	-267,9	0,228	69,3
22,47	-90,6	98,4	267,0	2,734	235
22,26	-56	-78,48	31,04	7,777	468
(22,41)	-31	173	346	2,078	230
(22,41)	-70,5	255,3	496	3,116	—
(22,41)	80	287	—	—	—
(22,41)	-96,5	-40	245	4,449	—
(22,41)	-129	34,6	194	3,606	264
22,05	-90,8	-88,7	36,5	7,262	457
22,1	-51	-36	150	8,203	—
22,39	-218,83	-182,97	-118,4	5,067	410
22,38	-157,2	-153,2	-63,8	5,498	908
22,29	-111,9	-108,8	16,6	5,870	1110
22,36	-182,5	-161,5	-82,1	4,635	162
22,37	-92,5	-6,5	156,9	7,448	—

Название вещества и его химическая формула	Молекулярная масса M	Плотность при нормальных условиях ρ , кг/м ³	Относительная плотность (к воздуху)
Метиловый спирт (CH ₄ O)	32,04	1,426	1,103
Неон (Ne)	20,183	0,8999	0,6961
Нитрозилхлорид (NOCl)	65,465	2,9919	2,314
Озон (O ₃)	48,000	2,22	1,71
Окись азота (NO)	30,008	1,3402	1,0367
Окись углерода (CO)	28,01	1,2500	0,9669
Н-октан (C ₈ H ₁₈)	114,22	5,030	3,890
Н-пентан (C ₅ H ₁₂)	72,14	3,457	2,674
Изо-пентан (C ₅ H ₁₂)	72,14	(3,22)	2,49
Пропан (C ₃ H ₈)	44,09	2,0037	1,550
Пропилен (C ₃ H ₆)	42,08	1,915	1,481
Селеновая кислота (H ₂ Se)	80,968	3,6643	2,9002
Сернистый газ (SO ₂)	64,06	2,9263	2,2635
Сернистый ангидрид (SO ₃)	80,06	(3,575)	2,765
Сероводород (H ₂ S)	34,08	1,5392	1,1906
Фосфористый водород (PH ₃)	34,04	1,530	1,183
Фреон-11 (CF ₃ Cl)	137,4	(6,13)	4,74
Фреон-12 (CF ₂ Cl ₂)	120,92	5,510	4,262
Фреон-13 (CFCl ₃)	114,47	(5,11)	3,95
Фтор (F ₂)	38,000	1,695	1,31
Фтористый кремний (SiF ₄)	104,06	4,6905	3,7133
Фтористый метил (CH ₃ F)	34,03	1,545	1,195
Хлор (Cl ₂)	70,914	3,22	2,49
Хлористый водород (HCl)	36,465	1,6391	1,2679
Хлористый метил (CH ₃ Cl)	50,49	2,307	1,784
Хлороформ (CHCl ₃)	119,39	5,283	4,087
Циан (C ₂ N ₂)	52,04	(2,765)	2,14
Цианистая кислота (HCN)	27,026	(1,205)	0,953
Этан (C ₂ H ₆)	30,07	1,356	1,049
Этиламин (C ₂ H ₇ N)	45,08	2,0141	0,706
Этилен (C ₂ H ₄)	28,05	1,2605	0,9750
Этиловый спирт (C ₂ H ₆ O)	46,07	2,043	1,580
Хлористый этил (C ₂ H ₅ Cl)	64,52	(2,88)	2,225

Примечания: 1. У некоторых веществ температура кипения при атмосферном давлении условными, но ими пользуются для расчетов ρ при различных температурах и давлениях.

*1 Тройная точка. *2 Точка сублимации.

Объем киломоля $m^3/kмоль$	Температура, °C			Критическое давление $p_{кр}$, МН/м ²	Критическая плотность $\rho_{кр}$, кг/м ³
	плавления $t_{пл}$	кипения $t_{кип}$	критическая $t_{кр}$		
22,47	-98	64,51	240	7,948	272
22,43	-248,6	-246,1	-228,7	2,724	484
21,88	-61,5	-5,5	165	9,369	—
21,6	-252	-112	-5	6,782	537
22,39	-163,5	-152	-93	6,778	52
22,40	-205	-191,5	-140	3,489	301
22,71	-57	-125,7	296,7	2,489	233
20,87	-135,5	36,1	196,6	3,371	232
(22,41)	-160,0	28,0	187,8	3,332	234
22,00	-189,9	-42,6	96,8	4,253	220
21,96	-185,2	-47	92,0	4,616	233
21,82	—	—	—	—	—
21,89	-75,3	-10,0	157,5	7,879	524
(22,41)	-16,8	46	218,2	8,487	633
22,14	-85,6	-60,4	100,4	8,996	349
22,25	-133,5	-87,5	51,3	6,527	—
(22,41)	-111	23,65	198,0	4,371	554
21,95	-155	-29,8	111,5	3,920	555
(22,41)	-181	-81,50	28,75	3,861	581
22,42	-120	-188	-101	5,566	—
22,18	-90	-75	-14,1	3,714	—
22,03	—	-78	44,6	5,870	300
22,02	-100,5	-33,95	144	7,703	573
22,25	-11,2	-85	51,4	8,252	420
21,88	-91,5	-24,0	143,1	6,674	353
22,60	-68,5	61,30	263,4	5,468	500
(22,41)	-34,4	-21	128,3	6,076	—
(22,41)	-14,2	-20,8	183,5	5,370	195
22,16	-183,6	-88,6	132,3	4,880	203
22,37	-81	16,5	183	5,615	248
22,24	-169,4	-103,5	9,2	5,057	227
22,55	-114,5	78,3	243,1	6,380	276
(22,41)	-138,7	12,2	187,2	5,263	330

выше 0°C. Для паров этих веществ значения плотности при нормальных условиях ρ_0 являются
2. В скобках приведены плотности, подсчитанные по формуле для идеальных газов $\rho = M/22,41$.

Таблица I-2

Состав атмосферного воздуха (на высоте уровня моря)

Название газа и его химическая формула	Содержание		Название газа и его химическая формула	Содержание	
	% (объемн.)	% (по массе)		% (объемн.)	% (по массе)
Азот (N ₂)	78,09	75,5	Криптон (Kr)	0,000108	0,0003
Кислород (O ₂)	20,95	23,10	Ксенон (Xe)	0,000008	0,0004
Аргон (Ar)	0,9325	1,286	Радон (Rn)	6,10 ⁻¹⁸	—
Неон (Ne)	0,0018	0,0012	Двуокись углерода (CO ₂)	0,030	0,046
Гелий (He)	0,0005	0,00007	Водород (H ₂)	0,00005	—

Примечание. В составе не учтено содержание водяного пара, количество которого колеблется в атмосфере между 0,02 и 2% по массе.

Таблица I-3

Теплофизические свойства газов в зависимости от температуры (одноатомные газы)

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$a \cdot 10^2, \text{м}^2/\text{ч}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
Аргон (Ar)								
0	16,5	21,1	0,663	11,8	0,519	1,67	6,41	1,784
100	21,2	26,9	0,661	20,6	0,519	1,67	11,2	1,305
200	25,6	32,2	0,653	31,2	0,519	1,67	17,2	1,030
300	29,9	36,9	0,640	43,4	0,519	1,67	24,4	0,850
400	33,9	41,1	0,628	56,7	0,519	1,67	32,6	0,724
500	37,9	45,2	0,619	72,0	0,519	1,67	42,0	0,627
600	39,4	48,5	0,604	87,0	0,519	1,67	51,9	0,558
Гелий (He)								
0	143	18,7	0,684	105	5,204	1,67	55,2	0,1785
100	179	22,9	0,667	176	5,204	1,67	94,8	0,1305
200	213	27,0	0,660	270	5,204	1,67	143	0,1030
300	244	30,8	0,656	362	5,204	1,67	199	0,0850
400	276	34,3	0,648	474	5,204	1,67	263	0,0724
500	305	37,6	0,642	611	5,204	1,67	336	0,0627
600	333	40,3	0,631	723	5,204	1,67		0,0558
Неон (Ne)								
0	46,4	29,7	0,660	33,0	1,030	1,67	18,0	0,9000
100	57,8	36,4	0,648	55,3	1,030	1,67	30,6	0,659
200	68,6	42,5	0,637	81,8	1,030	1,67	46,1	0,519
300	78,5	48,2	0,633	112	1,030	1,67	64,0	0,429
400	88,0	53,4	0,625	146	1,030	1,67	84,3	0,365
500	97,2	58,4	0,619	185	1,030	1,67	107	0,318
600	106	63,0	0,612	224	1,030	1,67	132	0,281

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$	$\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с/м}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\frac{c_p}{c_v}, \text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{ч}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Криптон (Kr)								
0	8,88	23,4	0,656	6,28	0,249	1,67	3,44	3,74
100	11,6	30,6	0,656	11,2	0,249	1,67	6,13	7,74
200	14,3	37,3	0,648	17,2	0,249	1,67	9,59	2,16
300	16,7	43,2	0,637	24,3	0,249	1,67	13,7	1,73
400	19,3	48,5	0,625	32,0	0,249	1,67	18,4	1,516
500	21,7	53,4	0,611	40,5	0,249	1,67	23,7	1,32
600	24,1	59,2	0,612	50,6	0,249	1,67	29,8	1,17

Ксенон (Xe)

0	5,23	21,1	0,638	3,41	0,158	1,67	2,02	5,89
100	6,95	28,2	0,643	6,55	0,158	1,67	3,67	4,31
200	8,63	34,8	0,639	10,2	0,158	1,67	5,77	3,40
300	10,2	40,7	0,630	14,5	0,158	1,67	8,28	2,81
400	11,7	46,4	0,619	19,4	0,158	1,67	11,3	2,39
500	13,5	51,4	0,603	24,7	0,158	1,67	14,7	2,08
600	15,0	54,9	0,579	29,9	0,158	1,67	18,5	1,84

Пары ртути (Hg)

200	7,68	45,1	0,620	—	—	—	—	—
300	9,36	55,3	0,618	—	—	—	—	—
400	11,0	65,8	0,616	18,1	0,104	1,67	10,4	3,64
500	12,7	74,5	0,613	24,1	0,104	1,67	13,8	3,16
600	14,4	85,0	0,612	31,1	0,104	1,67	17,5	2,80

Таблица I-4

Теплофизические свойства газов в зависимости от температуры (двухатомные газы)

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$	$\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с/м}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\frac{c_p}{c_v}, \text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{ч}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Азот (N ₂)								
0	24,3	16,7	0,705	13,3	1,030	1,402	6,89	1,250
100	31,5	20,7	0,678	22,5	1,034	1,400	11,6	0,916
200	38,5	24,2	0,656	33,6	1,043	1,394	18,3	0,723
300	44,9	27,7	0,652	46,4	1,060	1,385	25,5	0,597
400	50,7	30,9	0,659	60,9	1,082	1,375	33,3	0,508
500	55,8	33,9	0,672	76,9	1,106	1,364	41,1	0,442
600	60,4	36,9	0,689	94,3	1,129	1,355	49,1	0,392
700	64,2	39,6	0,710	113	1,151	1,345	57,0	0,352
800	67,2	42,3	0,734	133	1,171	1,337	65,4	0,318
900	70,1	45,0	0,762	154	1,188	1,331	73,1	0,291
1000	72,3	47,5	0,795	177	1,203	1,323	80,2	0,268

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\eta \cdot 10^3, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$	$\frac{c_p}{c_v}, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$a \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{ч}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
Водород (H₂)								
0	172	8,36	0,688	93,0	14,19	1,410	48,6	0,0899
100	220	10,3	0,677	157	14,45	1,398	83,4	0,0657
200	264	12,1	0,666	233	14,50	1,396	126	0,0519
300	307	13,8	0,655	323	14,53	1,395	178	0,0428
400	348	15,4	0,644	423	14,58	1,394	236	0,0364
500	387	16,9	0,640	534	14,66	1,390	300	0,0317
600	427	18,3	0,635	656	14,78	1,387	370	0,0281
700	463	19,7	0,637	785	14,93	1,381	443	0,0252
800	500	21,1	0,638	924	15,11	1,375	523	0,0228
900	536	22,4	0,640	1070	15,31	1,369	603	0,0209
1000	571	23,7	0,644	1230	15,52	1,361	688	0,0192
Воздух								
0	24,4	17,2	0,707	13,3	1,004	1,400	6,76	1,293
100	32,1	21,9	0,688	23,0	1,009	1,397	12,1	0,946
200	39,3	26,0	0,680	34,8	1,026	1,390	18,4	0,747
300	46,1	29,7	0,674	48,2	1,047	1,378	25,7	0,616
400	52,1	33,0	0,678	63,0	1,068	1,366	33,5	0,524
500	57,4	36,2	0,687	79,3	1,093	1,357	41,5	0,456
600	62,3	39,1	0,699	96,8	1,114	1,345	49,9	0,404
700	67,1	41,8	0,706	115	1,135	1,337	58,7	0,363
800	71,8	44,3	0,713	135	1,156	1,330	68,2	0,328
900	76,3	46,7	0,717	155	1,172	1,325	77,8	0,301
1000	80,7	49,0	0,719	178	1,185	1,320	88,8	0,276
Кислород (O₂)								
0	24,7	19,4	0,720	13,6	0,9148	1,397	6,80	1,429
100	32,9	24,1	0,686	23,1	0,9336	1,385	12,1	1,05
200	40,7	28,5	0,674	34,6	0,9630	1,370	15,6	0,826
300	48,0	32,5	0,673	47,8	0,9948	1,353	25,4	0,682
400	55,0	36,3	0,675	62,8	1,0236	1,340	33,3	0,580
500	61,5	40,0	0,682	79,6	1,0484	1,364	42,0	0,504
600	67,5	43,5	0,689	97,6	1,0689	1,321	50,8	0,447
700	72,8	46,8	0,700	117	1,0856	1,314	60,8	0,402
800	77,7	50,2	0,710	138	1,0999	1,307	70,0	0,363
900	82,0	53,4	0,725	161	1,1120	1,304	79,7	0,333
1000	85,8	56,5	0,738	184	1,1229	1,300	90,0	0,306
Окись углерода (CO)								
0	23,3	16,6	0,740	13,3	1,0396	1,400	6,46	1,250
100	30,1	20,7	0,718	22,6	1,0446	1,397	11,3	0,916
200	36,5	24,4	0,708	33,8	1,0584	1,389	17,9	0,723
300	42,6	27,9	0,709	47,0	1,0802	1,379	23,8	0,596
400	48,5	31,2	0,711	61,8	1,1057	1,367	31,1	0,508
500	54,1	34,4	0,720	78,0	1,1321	1,354	38,9	0,442
600	59,7	37,4	0,727	96,0	1,1568	1,344	47,4	0,392
700	65,0	40,4	0,706	115	1,1790	1,335	56,6	0,351
800	70,1	43,2	0,739	135	1,1987	1,329	66,7	0,317
900	75,5	46,0	0,740	157	1,2158	1,321	76,8	0,291
1000	80,6	48,7	0,744	180	1,2305	1,317	88,1	0,268

Таблица I-5

Теплофизические свойства газов в зависимости от температуры (трехатомные газы).

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^8, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\gamma \cdot 10^8, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{\rho}{\rho_0}, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$a \cdot 10^2, \text{м}^2/\text{ч}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
Водяной пар (H_2O)								
100	23,7	12,0	1,06	19,4	2 102	1,28	6,92	0,588
200	33,5	15,9	0,94	30,6	1,976	1,30	13,2	0,464
300	44,2	20,0	0,91	44,3	2,014	1,29	20,6	0,384
400	55,9	24,3	0,90	60,5	2,073	1,28	29,8	0,326
500	68,4	28,6	0,90	78,8	2,135	1,27	40,6	0,284
600	81,8	33,1	0,89	99,8	2,206	1,26	53,1	0,252
700	95,6	37,8	0,90	122	2,273	1,25	67,0	0,226
800	110,3	42,6	0,91	147	2,345	1,25	82,9	0,204
900	124,4	47,5	0,92	174	2,416	1,24	99,3	0,187
1000	140,7	52,4	0,92	204	2,483	1,23	119	0,172
Двуокись серы (SO_2)								
0	8,4	12,1	0,874	4,14	0,607	1,272	1,70	2,926
100	12,3	16,1	0,863	7,51	0,662	1,243	3,14	2,140
200	16,6	20,0	0,856	11,8	0,712	1,223	4,48	1,690
300	21,2	23,8	0,848	17,1	0,754	1,207	7,25	1,395
400	25,8	27,6	0,834	23,3	0,783	1,198	10,0	1,187
500	30,7	31,3	0,822	30,4	0,808	1,191	13,2	1,033
600	35,8	35,0	0,806	38,3	0,825	1,187	17,0	0,916
700	41,1	38,6	0,788	46,8	0,834	1,184	21,5	0,892
800	46,3	42,2	0,774	56,5	0,850	1,179	26,4	0,743
900	51,9	45,7	0,755	66,8	0,858	1,177	32,0	0,681
1000	57,6	49,2	0,740	78,3	0,867	1,175	38,2	0,626
Двуокись углерода (CO_2)								
0	14,7	14,0	0,780	7,09	0,8148	1,301	3,28	1,9767
100	22,8	18,2	0,733	12,6	0,9136	1,260	6,21	1,447
200	30,9	22,4	0,715	19,2	0,9927	1,235	9,83	1,143
300	39,1	26,4	0,712	27,3	1,0567	1,217	14,1	0,944
400	47,2	30,2	0,709	36,7	1,1103	1,205	19,1	0,802
500	54,9	34,0	0,713	47,2	1,1547	1,195	24,6	0,698
600	62,1	37,7	0,723	58,3	1,1920	1,188	30,8	0,618
700	68,7	41,1	0,730	71,4	1,2230	1,180	36,6	0,555
800	75,1	44,6	0,741	85,3	1,2493	1,177	43,2	0,502
900	80,9	48,2	0,757	100	1,2715	1,174	49,9	0,460
1000	86,3	51,5	0,770	116	1,2900	1,171	56,9	0,423

Таблица I-6

Углеводороды метанового ряда C_nH_{2n+2}

$t, ^\circ C$	$\lambda \cdot 10^3,$ Вт/(м \cdot °C)	$\eta \cdot 10^6,$ Н \cdot с/м 2	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м 2 /с	$\frac{c_p}{c_v} \cdot$ кДж/(кг \cdot °C)	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$a \cdot 10^2,$ м 2 /ч	$\rho,$ кг/м 3
Метан (CH $_4$)								
0	30,7	10,39	0,734	14,5	2,1654	1,314	7,13	0,7168
100	46,5	13,24	0,698	25,1	2,4484	1,268	13,0	0,525
200	63,7	15,89	0,703	38,2	2,8068	1,225	19,8	0,414
300	82,3	18,34	0,707	53,5	3,1753	1,193	27,3	0,342
400	102	20,69	0,717	71,9	3,5295	1,171	35,8	0,291
500	122,1	22,95	0,726	90,8	3,8560	1,155	45,1	0,253
600	144,2	25,20	0,726	113,0	4,1529	1,141	55,8	0,224
Этан (C $_2$ H $_6$)								
0	19	8,60	0,746	6,41	1,6471	1,202	3,09	1,342
100	31,9	11,38	0,738	11,6	2,0674	1,154	5,64	0,983
200	47,5	14,12	0,741	18,2	2,4899	1,124	8,85	0,776
300	65,4	16,79	0,736	26,2	2,8696	1,105	12,8	0,640
400	85,5	19,32	0,726	35,6	3,2138	1,095	17,5	0,545
500	107,9	21,97	0,715	46,4	3,5190	1,085	23,3	0,474
600	132,6	24,52	0,701	58,5	3,7869	1,077	30,1	0,420
Пропан (C $_3$ H $_8$)								
0	15,2	7,50	0,762	3,81	1,5495	1,138	1,80	1,967
100	26,3	10,00	0,768	6,94	2,0168	1,102	3,26	1,44
200	40,1	12,45	0,763	10,9	2,4581	1,083	5,17	1,14
300	56,2	14,81	0,748	15,8	2,8345	1,070	7,61	0,939
400	74,8	17,16	0,727	21,6	3,1610	1,062	10,7	0,799
500	95,6	19,42	0,700	28,2	3,4487	1,057	14,4	0,694
600	118,6	21,77	0,678	35,6	3,6974	1,053	18,8	0,616
Бутан (C $_4$ H $_{10}$)								
0	13,3	6,84	0,821	2,63	1,5918	1,097	1,16	2,593
100	23,5	9,26	0,798	4,87	2,0273	1,075	2,20	1,90
200	36,5	11,67	0,784	7,78	2,4556	1,061	3,57	1,50
300	51,9	14,02	0,761	11,3	2,8149	1,052	5,37	1,24
400	69,8	16,38	0,734	15,6	3,1292	1,046	7,64	1,05
500	90,2	18,73	0,706	20,5	3,4043	1,043	10,4	0,916
600	113,0	21,08	0,679	26,1	3,6442	1,040	13,7	0,812
Пентан (C $_5$ H $_{12}$)								
0	12,3	6,35	0,821	—	1,5931	1,077	—	—
100	22,0	8,65	0,796	3,67	2,0247	1,060	1,66	2,355
200	34,1	10,88	0,781	5,90	2,4476	1,049	2,69	1,86
300	48,6	13,24	0,763	8,62	2,7993	1,042	4,08	1,54
400	65,5	15,49	0,735	11,8	3,1075	1,037	5,81	1,31
500	84,7	17,75	0,708	15,6	3,3771	1,035	7,96	1,14
600	106,1	20,10	0,684	19,9	3,6103	1,031	10,5	1,01

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3,$ Вт/(м·°C)	$\eta \cdot 10^6,$ Н·с/м ²	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$\frac{c_p}{c_v} \cdot$ кДж/(кг·°C)	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$\alpha \cdot 10^2,$ м ² /ч	$\rho, \text{кг/м}^3$
Гексан (C₆H₁₄)								
0	11,2	5,90	0,841	—	1,6023	1,063	—	—
100	20,2	8,15	0,814	2,89	2,0231	1,050	12,8	2,813
200	32,0	10,39	0,796	4,68	2,4438	1,040	21,2	2,220
300	45,9	12,65	0,769	6,92	2,7909	1,035	32,4	1,833
400	62,5	14,91	0,738	9,60	3,0936	1,031	46,6	1,560
500	81,2	17,26	0,732	12,7	3,4415	1,029	62,7	1,355
600	102,6	19,52	0,632	16,2	3,5868	1,027	85,7	1,202
Гептан (C₇H₁₆)								
0	10,7	5,39	0,812	—	1,6102	1,053	—	—
100	19,3	17,29	0,784	2,28	2,0197	1,042	10,5	3,27
200	30,5	9,62	0,771	3,72	2,4406	1,035	17,4	2,58
300	43,7	11,77	0,749	5,51	2,7849	1,030	26,6	2,13
400	59,4	13,93	0,722	7,68	3,0832	1,027	38,4	1,81
500	77,3	16,08	0,695	10,1	3,3457	1,025	52,6	1,58
600	97,7	18,34	0,670	13,0	3,5697	1,023	70,4	1,40
Октан (C₈H₁₈)								
0	9,8	4,93	0,816	—	1,6144	1,046	—	—
100	17,7	6,79	0,776	1,82	2,0209	1,037	8,46	3,73
200	27,8	8,65	0,759	2,94	2,4488	1,030	13,9	2,945
300	40	40,49	0,729	4,32	2,7800	1,026	21,3	2,43
400	54,3	12,36	0,700	5,96	3,0756	1,023	30,7	2,07
500	70,6	14,32	0,677	7,88	3,3360	1,022	42,3	1,80
600	89,2	16,18	0,646	10,1	3,5571	1,020	56,8	1,59

Таблица I-7

Многоатомные газы

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3,$ Вт/(м·°C)	$\eta \cdot 10^6,$ Н·с/м ²	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$\frac{c_p}{c_v} \cdot$ кДж/(кг·°C)	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$\alpha \cdot 10^2,$ м ² /ч	$\rho, \text{кг/м}^3$
Аммиак (NH₃)								
0	21,1	9,36	0,908	12,2	2,043	0,31	4,81	0,7714
100	34,0	13,04	0,852	23,2	2,219	1,28	9,78	0,564
200	48,8	16,67	0,818	38,0	2,399	1,26	16,5	0,445
300	65,5	20,59	0,812	56,4	2,583	1,24	24,8	0,368
400	84,0	24,32	0,796	78,7	2,747	1,22	35,1	0,313
500	103,6	28,15	0,793	105	2,918	1,20	47,0	0,272
600	124,4	31,97	0,792	134	3,082	1,19	60,6	0,241
700	147,7	35,99	0,791	168	3,245	1,18	75,8	0,217
800	171,0	39,81	0,793	205	3,404	1,17	92,7	0,196
900	196,5	44,13	0,798	247	3,555	1,16	111	0,179
1000	222,1	47,86	0,800	291	3,709	1,15	131	0,165

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м \cdot °C)	$\eta \cdot 10^4$, Н \cdot с/м 2	Pr	$\nu \cdot 10^4$, м 2 /с	$\frac{c_p}{c_v}$, кДж/ф (кг \cdot °C)	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$\alpha \cdot 10^3$, м 2 /ч	ρ , кг/м 3
Ацетон (C₃H₆O)								
0	9,7	6,86	0,386	—	1,256	1,130	—	—
100	17,3	9,41	0,840	5,07	1,537	1,103	2,18	1,87
200	26,9	12,06	0,806	8,22	1,788	1,086	3,68	1,47
300	38,6	14,71	0,774	12,1	2,022	1,076	5,64	1,22
400	52,1	17,36	0,743	16,9	2,236	1,067	8,15	1,03
500	67,5	20,00	0,720	22,3	2,428	1,062	11,1	0,901
600	84,7	22,75	0,695	28,3	2,587	1,059	14,7	0,799
Бензол (C₆H₆)								
0	9,2	6,98	0,716	—	0,943	1,127	—	—
100	17,3	7,21	0,554	3,74	1,325	1,086	1,84	2,55
200	28,1	12,28	0,719	5,99	1,676	1,067	3,01	2,01
300	41,6	14,64	0,688	8,80	1,956	1,057	4,62	1,66
400	57,6	17,20	0,652	12,1	2,183	1,050	6,74	1,41
500	76,4	19,76	0,614	15,9	2,369	1,047	9,44	1,23
600	96,3	22,31	0,585	20,4	2,524	1,044	12,6	1,09
Бромметил (CH₃Br)								
0	6,3	12,26	0,819	—	0,418	1,27	—	—
100	10,7	17,06	0,838	5,49	0,523	1,20	2,33	3,15
200	16	21,87	0,818	8,94	0,595	1,17	3,94	2,45
300	22	26,77	0,793	13,2	0,649	1,15	6,03	2,02
400	28,8	31,77	0,770	18,4	0,699	1,14	8,64	1,72
500	36,5	36,68	0,745	24,5	0,741	1,13	11,8	1,50
600	44,9	41,68	0,726	31,4	0,783	1,13	15,5	1,38
Толуол (C₇H₈)								
0	13	6,609	0,748	—	1,023	1,097	—	—
100	—	8,855	—	—	1,411	1,068	—	—
200	—	11,013	—	4,65	1,750	1,054	—	2,38
300	—	13,239	—	6,75	2,047	1,045	—	1,96
400	—	15,396	—	9,23	2,294	1,040	—	1,667
500	—	17,456	—	12,0	2,504	1,036	—	1,45
600	—	19,613	—	15,3	2,671	1,034	—	1,28
Хлорметил (CH₃Cl)								
0	9,2	9,807	0,818	4,25	0,770	1,27	1,86	2,31
100	15,4	13,435	0,805	7,96	0,921	1,22	3,55	1,69
200	24,2	17,162	0,750	12,8	1,059	1,18	6,17	1,33
300	33,8	20,790	0,727	18,9	1,185	1,16	9,39	1,10
400	45	24,517	0,706	26,2	1,296	1,15	13,3	0,938
500	57,5	28,243	0,685	34,6	1,394	1,13	18,2	0,815
600	71,3	31,969	0,666	44,2	1,486	1,12	23,9	0,723

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^8, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{ч}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
Хлороформ (CHCl_3)								
0	6,4	9,620	0,806	—	0,532	1,15	—	—
100	10	12,847	0,78	3,33	0,607	1,13	1,54	3,86
200	14,2	16,083	0,754	5,29	0,666	1,12	2,51	3,05
300	18,8	19,319	0,730	7,67	0,712	1,11	3,78	2,52
400	23,7	22,458	0,702	10,5	0,741	1,10	5,39	2,14
500	29,1	25,595	0,667	13,7	0,758	1,10	7,43	1,86
Циклогексан (C_6H_{12})								
0	9,7	6,384	0,718	—	1,094	1,100	—	—
100	18,1	8,296	0,768	3,075	1,647	1,064	1,44	2,75
200	29,2	10,503	0,769	4,84	2,139	1,049	2,26	2,17
300	42,8	12,504	0,749	7,00	2,566	1,040	3,35	1,79
400	58,8	14,475	0,723	9,50	2,938	1,033	4,74	1,52
500	79,3	16,034	0,656	12,4	3,246	1,030	6,67	1,32
600	99,4	18,338	0,646	15,7	3,502	1,027	8,74	1,17
Четыреххлористый углерод (CCl_4)								
0	6	9,24	0,802	—	0,520	1,116	—	—
100	8,7	12,31	0,828	2,45	0,587	1,101	1,06	5,02
200	11,6	15,29	0,816	3,86	0,620	1,095	1,70	3,97
300	14,7	18,24	0,796	5,59	0,641	1,092	2,52	3,275
400	17,8	21,18	0,776	7,64	0,654	1,090	3,51	2,79
500	21,2	24,03	0,758	9,96	0,667	1,088	4,72	2,42
600	24,5	26,87	0,741	12,6	0,676	1,087	6,08	2,15
Этилацетат ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)								
0	9,1	6,91	0,892	—	1,168	1,088	—	—
100	16,6	9,47	0,832	5,16	1,465	1,069	1,42	2,88
200	26,3	12,06	0,798	8,32	1,742	1,056	2,39	2,27
300	38,3	14,61	0,765	12,2	2,005	1,049	3,67	1,87
400	52,2	17,06	0,733	16,9	2,257	1,043	5,21	1,60
500	68,2	19,71	0,723	22,4	2,499	1,038	7,06	1,39
600	86,9	22,35	0,703	28,5	2,729	1,035	9,31	1,23
Этиловый эфир ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$)								
0	13	6,16	0,766	—	1,440	1,084	—	—
100	22,8	9,28	0,748	3,83	1,842	1,065	1,844	2,42
200	35,2	11,67	0,736	6,12	2,223	1,053	2,990	1,91
300	50	14,02	0,727	8,92	2,587	1,045	4,42	1,57
400	67,3	16,48	0,720	12,2	2,943	1,039	6,14	1,34
500	86,4	18,83	0,714	16,1	3,274	1,036	8,14	1,17
600	108,2	21,18	0,716	20,5	3,609	1,032	10,4	1,03

Таблица I-8

Физические характеристики дымовых газов среднего состава
(11 % водяных паров и 13% углекислого газа) в зависимости от температуры

°C	λ , Вт/(м·°C)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr	°C	λ , Вт/(м·°C)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	0,0228	12,2	0,72	900	0,100	152	0,59
100	0,0313	21,5	0,69	1000	0,109	174	0,58
200	0,0401	32,8	0,67	1100	0,1175	197	0,57
300	0,0484	45,8	0,65	1200	0,1255	221	0,56
400	0,057	60,4	0,64	1300	0,1350	245	0,55
500	0,0655	76,3	0,63	1400	0,1442	272	0,54
600	0,0742	93,6	0,62	1500	0,1535	297	0,53
700	0,0827	112	0,61	1600	0,1628	323	0,52
800	0,0915	132	0,60				

Примечание. В таблице приведены значения коэффициента теплопроводности λ_{cp} , коэффициента кинематической вязкости ν_{cp} и критерия Прандтля Pr_{cp} . Для дымовых газов другого состава значение, полученное из таблицы, следует умножить на поправку, определенную для коэффициента кинематической вязкости ν/ν_{cp} — по рис. 1, коэффициента теплопроводности λ/λ_{cp} — по рис. 2 и критерия Прандтля Pr/Pr_{cp} — по рис. 3.

Поправки определяют в зависимости от температуры дымовых газов t и парциального давления r_{H_2O} .

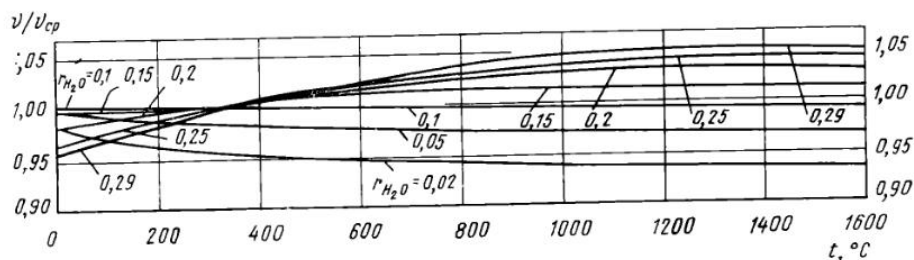


Рис. 1. Поправка для определения вязкости ν дымовых газов в зависимости от влажности r_{H_2O} и температуры t

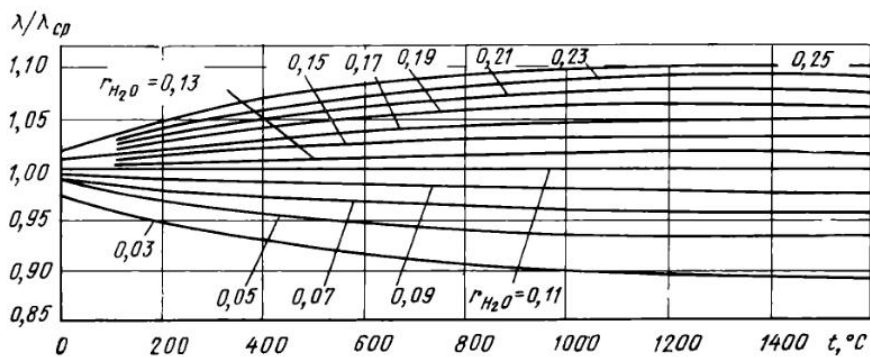


Рис. 2. Поправка для определения теплопроводности дымовых газов в зависимости от их влажности r_{H_2O} и температуры t

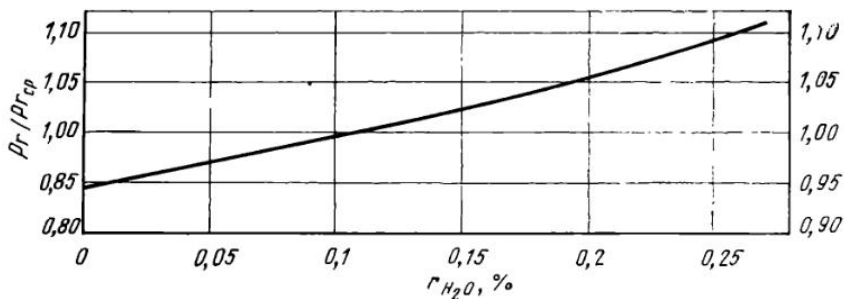


Рис. 3. Поправка для определения критерия Прандтля P_r для дымовых газов в зависимости от влажности γ_{H_2O}

Таблица I-9

Теплоемкость¹ некоторых газов

$t, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$t, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$
<i>Ацетилен C₂H₂</i>		500	1,086
0	1,609	600	1,109
100	1,870	700	1,128
200	2,044	800	1,146
300	2,174	900	1,159
400	2,282	1000	1,172
500	2,376	1100	1,182
600	2,461	1200	1,191
<i>Закись азота N₂O</i>		<i>Сероводород H₂S</i>	
0	0,851	0	0,992
100	0,949	100	1,026
200	1,028	200	1,067
300	1,093	300	1,122
400	1,147	400	1,172
500	1,193	500	1,227
600	1,231	600	1,273
700	1,263	700	1,319
800	1,291	800	1,361
900	1,315	900	1,398
1000	1,335	1000	1,482
1100	1,353	1100	1,461
1200	1,369	1200	1,482
<i>Окись азота NO</i>		<i>Этилен C₂H₄</i>	
0	0,999	0	1,489
100	0,997	100	1,827
200	1,011	200	2,176
300	1,035	300	2,478
400	1,061	400	2,736
		500	2,958
		600	3,153

¹ Здесь и ниже имеется в виду удельная теплоемкость.

Таблица I-10

Средние теплоемкости газов $c_{ср}$, кДж/(м³·°С)

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	CH ₄	Воздух сухой	C ₂ H ₄	H ₂ S	C ₂ H ₆
0	1,306	1,294	1,298	1,277	1,599	1,495	1,733	1,549	1,298	1,825	1,507	2,211
100	1,319	1,298	1,302	1,289	1,700	1,507	1,813	1,641	1,302	2,064	1,532	2,495
200	1,336	1,298	1,306	1,298	1,788	1,524	1,888	1,758	1,306	2,282	1,562	2,776
300	1,357	1,306	1,315	1,298	1,863	1,541	1,955	1,888	1,315	2,495	1,595	3,044
400	1,377	1,315	1,327	1,302	1,930	1,566	2,018	2,014	1,327	2,688	1,633	3,308
500	1,398	1,327	1,344	1,306	1,989	1,591	2,060	2,139	1,344	2,864	1,671	3,555
600	1,415	1,340	1,357	1,310	2,043	1,616	2,114	2,261	1,357	3,027	1,700	3,776
700	1,436	1,352	1,373	1,315	2,088	1,641	2,152	2,378	1,369	3,178	1,746	3,986
800	1,449	1,365	1,386	1,319	2,098	1,666	2,181	2,504	1,382	3,308	1,784	4,174
900	1,465	1,377	1,398	1,323	2,169	1,696	2,215	2,600	1,398	3,433	1,817	4,363
1000	1,478	1,390	1,411	1,331	2,202	1,725	2,236	2,700	1,411	3,546	1,851	4,530
1100	1,491	1,403	1,424	1,336	2,236	1,750	2,261	2,788	1,424	3,655	1,884	4,685
1200	1,503	1,415	1,436	1,344	2,265	1,775	2,278	2,264	1,432	3,751	1,909	4,827
1300	1,511	1,424	1,449	1,352	2,290	1,805	2,299	2,889	1,444	—	—	—
1400	1,520	1,436	1,457	1,361	2,315	1,830	2,319	2,960	1,453	—	—	—
1500	1,528	1,444	1,465	1,369	2,336	1,855	2,340	3,044	1,470	—	—	—
1600	1,537	1,453	1,474	1,373	2,374	1,876	2,361	—	1,478	—	—	—
1700	1,545	1,461	1,482	1,382	2,374	1,901	2,382	—	1,486	—	—	—
1800	1,553	1,470	1,491	1,390	2,391	1,922	—	—	1,492	—	—	—
1900	1,562	1,474	1,499	1,398	2,407	1,943	—	—	1,499	—	—	—
2000	1,570	1,482	1,503	1,407	2,424	1,964	—	—	1,507	—	—	—
2100	1,574	1,491	1,511	1,415	2,437	1,985	—	—	1,516	—	—	—
2200	1,583	1,495	1,516	1,424	2,449	2,001	—	—	1,520	—	—	—
2300	1,591	1,503	1,520	1,432	2,462	2,018	—	—	1,624	—	—	—
2400	1,595	1,507	1,528	1,436	2,470	2,035	—	—	1,532	—	—	—
2500	1,604	1,511	1,532	1,444	2,483	2,052	—	—	1,537	—	—	—
2600	1,608	1,520	1,537	1,453	2,520	2,068	—	—	1,545	—	—	—
2700	1,616	1,528	1,545	1,461	2,533	2,085	—	—	1,553	—	—	—
2800	1,624	1,537	1,553	1,465	2,546	2,102	—	—	1,557	—	—	—
2900	1,629	1,545	1,562	1,474	2,558	2,114	—	—	1,566	—	—	—
3000	1,637	1,549	1,570	1,482	2,571	2,127	—	—	1,570	—	—	—

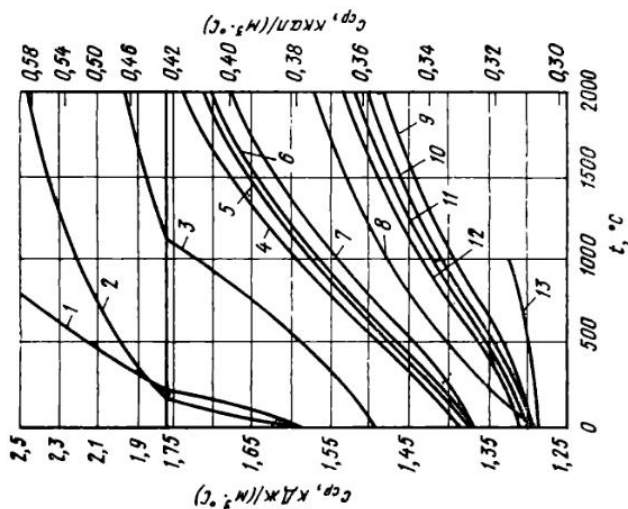


Рис. 4. Зависимость средних теплоемкостей $c_{ср}$ различных газов и продуктов сгорания от температуры t :
 1 — CH_4 ; 2 — CO ; 3 — H_2O ; 4 — дымовые газы от бурного угля и дерева; 5 — дымовые газы от торфа; 6 — дымовые газы от кокса, спекающегося антрацита; 7 — дымовые газы от коксового светлого газа; 8 — кислород; 9 — азот; 10 — сухой воздух; 11 — воздух влажностью 1,04%; 12 — воздух влажностью 1,08%; 13 — водород

Таблица I-11

Удельная энтальпия газов i , кДж/м³

t , °C	O ₂	N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	CH ₄	Воздух сухой	C ₂ H ₄	H ₂ S	C ₂ H ₆
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	131,9	129,8	130,2	129,0	170,0	150,70	181,3	164,1	130,2	206,4	153,2	248,7
200	267,1	259,6	261,3	259,6	357,6	304,8	377,6	351,7	261,3	456,4	312,3	552,7
300	404,07	391,9	394,4	389,4	558,9	462,2	586,6	566,5	394,4	748,6	478,6	913,1
400	551,0	525,9	530,9	520,8	772,0	626,3	807,2	805,5	530,9	1075,2	655,1	1023,0
500	699,2	663,4	672,0	653,1	994,4	795,5	1034,1	1099,7	672,0	1431,9	833,2	1777,3
600	849,1	803,9	813,9	783,0	1225,9	969,7	1268,6	1356,5	813,9	1816,2	1024,9	2265,9
700	1005,3	946,6	961,3	923,0	1462,4	1148,9	1506,4	1664,7	958,4	2218,6	1222,1	2790,1
800	1158,9	1091,9	1108,7	1055,1	1678,1	1333,1	1745,1	1996,3	1105,3	2646,1	1426,9	3339,4
900	1318,8	1239,7	1258,6	1190,7	1951,9	1526,1	1993,3	2340,0	1258,6	3089,9	1605,2	3926,4
1000	1477,9	1390,0	1410,9	1331,4	2202,3	1725,0	2235,8	2700,5	1410,9	3546,2	1850,6	4530,1
1100	1639,6	1542,8	1565,9	1469,1	2459,3	1929,3	2487,0	3067,2	1565,9	4020,6	2072,5	5154,0
1200	1803,7	1698,2	1723,3	1612,8	2718,1	2130,2	2733,1	3436,5	1718,3	4500,8	2291,0	5790,3
1300	1964,9	1850,7	1883,2	1758,0	2977,2	2345,9	2988,1	3755,6	1877,8	—	—	—
1400	2127,7	2010,5	2039,8	1905,0	3241,4	2561,5	3247,3	4144,1	2033,9	—	—	—
1500	2292,3	2166,7	2198,1	2053,6	3504,4	2782,1	3510,6	4546,9	2264,7	—	—	—
1600	2458,5	2324,5	2358,0	2197,2	3770,6	3001,1	3778,2	—	2690,4	—	—	—
1700	2626,4	2484,0	2519,6	2348,8	4035,7	3231,4	4049,9	—	2847,9	—	—	—
1800	2796,0	2645,2	2682,9	2602,0	4304,0	3459,1	—	—	—	—	—	—
1900	2967,2	2804,3	2847,9	2656,9	4572,0	3691,1	—	—	—	—	—	—
2000	3140,1	2964,3	3006,1	2813,5	4848,3	3927,2	—	—	—	—	—	—
2100	3305,9	3130,1	3174,0	2971,8	5116,3	4167,5	—	—	—	—	—	—
2200	3481,7	3298,3	3334,4	3131,7	5388,4	4404,5	—	—	—	—	—	—
2300	3659,3	3457,0	3495,6	3293,3	5660,6	4643,2	—	—	—	—	—	—
2400	3828,4	3617,4	3667,6	3446,6	5920,1	4881,8	—	—	—	—	—	—
2500	4008,9	3778,6	3830,9	3611,1	6209,0	5128,8	—	—	—	—	—	—
2600	4180,1	3951,5	3995,0	3773,2	6552,3	5375,9	—	—	—	—	—	—
2700	4362,6	4126,1	4171,3	3945,2	6837,0	5631,2	—	—	—	—	—	—
2800	4546,7	4304,0	4350,1	4103,1	7125,9	5886,6	—	—	—	—	—	—
2900	4722,7	4479,9	4530,1	4274,7	7419,0	6133,7	—	—	—	—	—	—
3000	4911,1	4647,3	4710,2	4446,4	7712,1	6380,7	—	—	—	—	—	—

Вязкость некоторых газов

$t, ^\circ\text{C}$	$\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$
Ацетилен C_2H_2		200	12,95	150	24,81
20	10,19	300	15,69	200	26,77
50	11,08	Метиленхлорид CH_2Cl_2		250	28,83
100	12,45	0	10,00	Хлористый водород HCl	
120	13,24	100	13,63	0	13,44
Закись азота N_2O		200	17,26	50	15,89
0	13,72	300	20,99	100	18,24
20	14,61	Метилхлорид CH_3Cl		150	20,59
50	15,98	0	9,28	200	22,95
100	18,34	100	12,45	250	25,30
150	20,39	200	15,79	300	27,65
200	22,56	Окись азота NO		Этилен C_2H_4	
250	24,61	0	17,85	20	10,00
300	26,48	50	20,39	50	10,98
Метилацетат $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$		100	22,65	100	12,45
0	7,52			150	14,02
100	10,29			200	15,39
				250	16,57

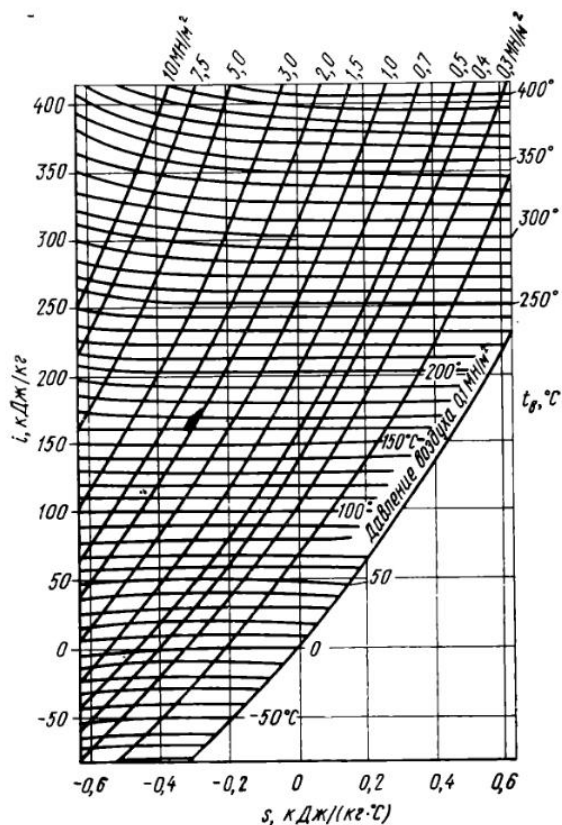


Рис. 5. Диаграмма $s-i$ для воздуха: $t_{\text{в}}$ — температура воздуха; i — энтальпия; s — энтропия; v — удельный объем; p — удельное давление; t — температура

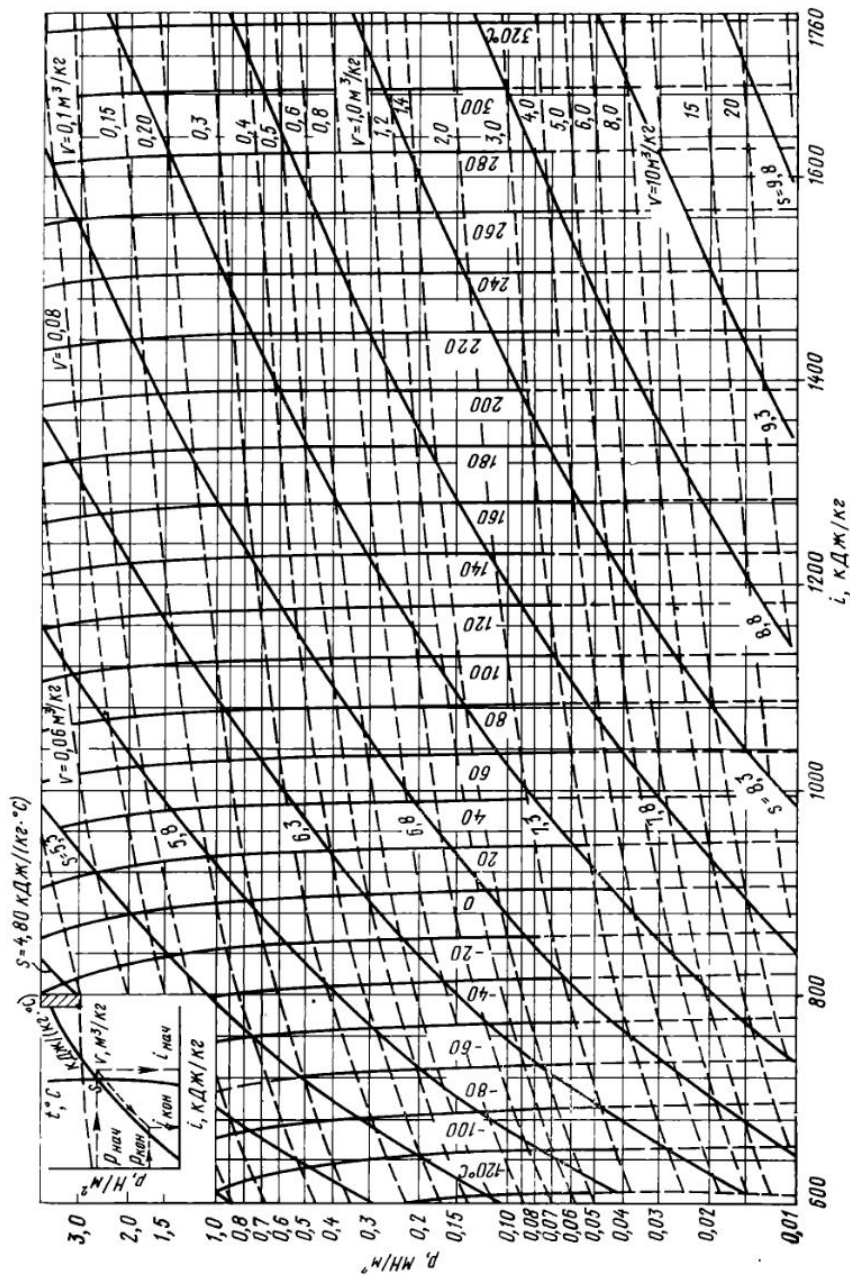


Рис. 6. Диаграмма состояния метана CH_4 в координатах i — p

Таблица I-13

Давление насыщенного водяного пара и содержание влаги в 1 м³ влажного газа

Температура, °С	Давление водяного пара, Н/м ²	Содержание влаги в 1 м ³ газа		Температура, °С	Давление водяного пара, Н/м ²	Содержание влаги в 1 м ³ газа		Температура, °С	Давление водяного пара, Н/м ²	Содержание влаги в 1 м ³ газа	
		г	% (объемн.)			г	% (объемн.)			г	% (объемн.)
-15	191,4	1,52	0,189	4	813,3	6,46	0,804	26	3360,5	26,70	3,32
-14	207,9	1,65	0,205	5	872,2	6,91	0,860	28	3779,1	30,00	3,73
-13	225,4	1,79	0,223	6	934,8	7,42	0,922	30	4241,6	33,70	4,19
-12	244,5	1,92	0,240	7	1001,5	7,94	0,988	32	4753,5	37,70	4,69
-11	259,7	2,05	0,256	8	1072,4	8,52	1,06	34	5318,7	42,20	5,25
-10	286,5	2,27	0,283	9	1147,6	9,10	1,13	36	5939,8	47,10	5,86
-9	310,1	2,45	0,306	10	1227,6	9,73	1,21	38	6623,7	52,70	6,55
-8	335,1	2,64	0,330	11	1312,2	10,40	1,29	40	7374,2	58,50	7,27
-7	361,9	2,86	0,356	12	1402,3	11,10	1,38	45	9581,6	76,00	9,46
-6	390,7	3,06	0,382	13	1497,0	12,60	1,48	50	12332,0	97,90	12,18
-5	421,6	3,34	0,416	14	1598,3	12,70	1,58	55	15729	125,0	15,5
-4	454,6	3,60	0,450	15	1704,9	13,50	1,68	60	19862	158,0	19,7
-3	489,6	3,76	0,469	16	1816,9	14,40	1,79	65	24994	198,0	24,7
-2	527,3	4,10	0,510	17	1936,8	15,50	1,93	70	31152	247,0	30,7
-1	567,6	4,53	0,565	18	2063,5	16,40	2,04	75	38537	306,0	38,0
±0	610,4	4,84	0,602	19	2196,8	17,40	2,17	80	47335	376,0	46,7
1	656,6	5,21	0,648	20	2338,1	18,50	2,30	90	70089	555,0	69,1
2	705,7	5,60	0,697	22	2643,3	21,00	2,61	100	101308	804,0	100,0
3	757,8	6,01	0,748	24	2983,3	23,60	2,94				

Таблица I-14

Значение коэффициента объемного расширения β и повышения давления α для различных газов

Газ	Температура, °С	ρ, Н/м ³	β · 10 ³ , 1/°С	Газ	Температура, °С	ρ, Н/м ³	α · 10 ³ , 1/°С
<i>При постоянном давлении</i>				<i>При постоянном объеме</i>			
Воздух	0—100	133300	3,6728	Воздух	0—100	133433	3,6744
H ₂	0—100	133300	3,6600	»	—	266600	3,690
H ₂	0—100	103308	3,6609	»	—	2666000	3,887
N ₂	0—100	147296	3,6742	»	0—1067	30659	3,6643
N ₂	0—100	20261 · 10 ³	4,34	H ₂	0—100	132500	3,6621
N ₂	—	10131 · 10 ⁴	2,18	H ₂	0—100	133300	3,6630
O ₂	—	10131 · 10 ³	4,86	H ₂	0—100	145297	3,6627
He	0—100	132500	3,6579	N ₂	0—100	87178	3,6696
CO	—	101308	3,669	N ₂	0—100	132500	3,6740
CO ₂	0—20	69049	3,7128	O ₂	0—100	87978	3,6738
CO ₂	0—100	69049	3,7073	O ₂	0—1067	23994—	3,6652
CO ₂	0—20	133033	3,7602			30659	
CO ₂	0—100	133033	3,7410	He	0—10	130634	3,6612
CO ₂	0—20	183554	3,7972	He	0—10	132500	3,6604
CO ₂	0—100	183554	3,7703	Ar	—	68916	3,668
N ₂ O	—	101308	3,719	CO	0—100	101308	3,667
SO ₂	—	101308	3,903	CO	0—1067	30659	3,6648
<i>При постоянном объеме</i>				CO ₂	0—100	69049,4	3,6981
Воздух	—	773,14	3,7666	CO ₂	0—20	133033,4	3,7335
»	—	13330	3,6630	CO ₂	0—100	133038,4	3,7262
»	—	101308	3,6650	CO ₂	0—1067	31992	3,6756
				N ₂ O	—	101308	3,676

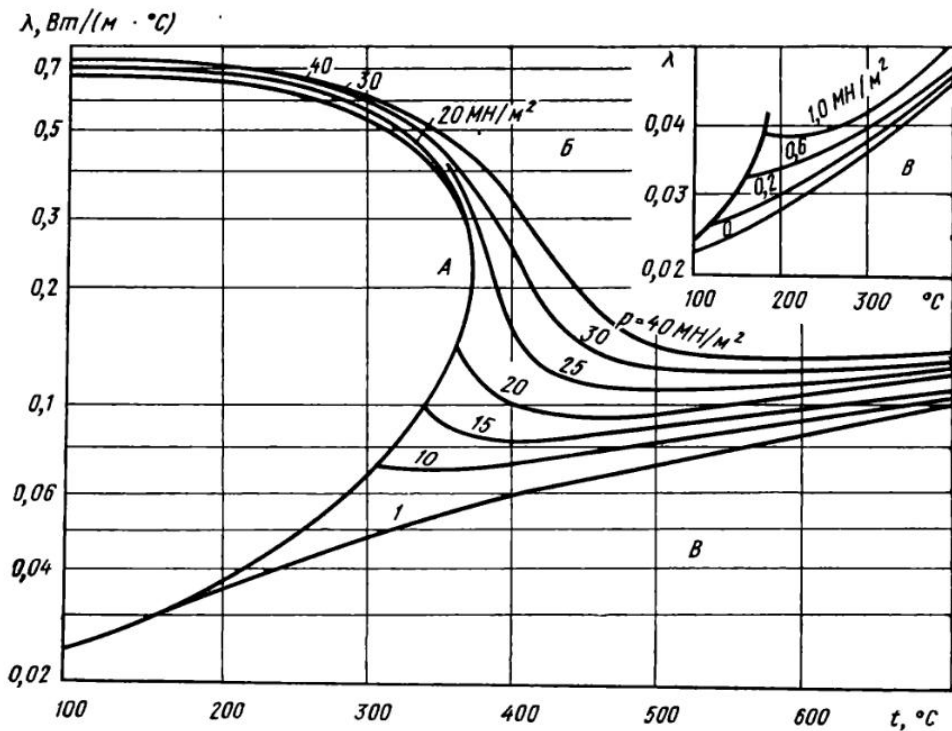


Рис. 7. Коэффициент теплопроводности λ воды и водяного пара:
 А — кривая насыщения; Б — область воды; В — область перегретого пара

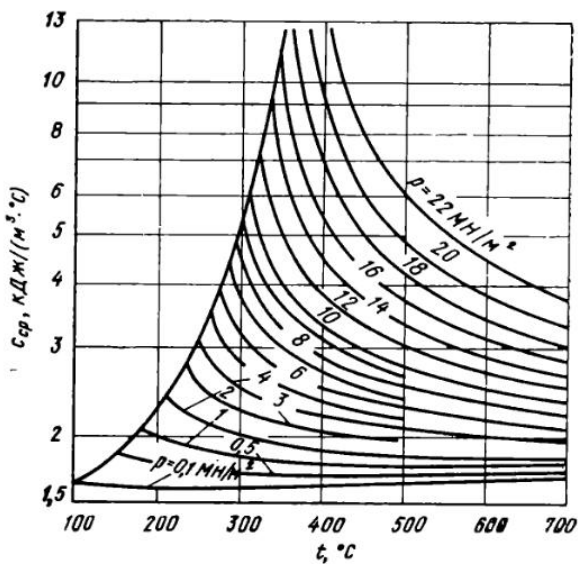


Рис. 8. Средние теплоемкости $c_{\text{ср}}$ водяного пара

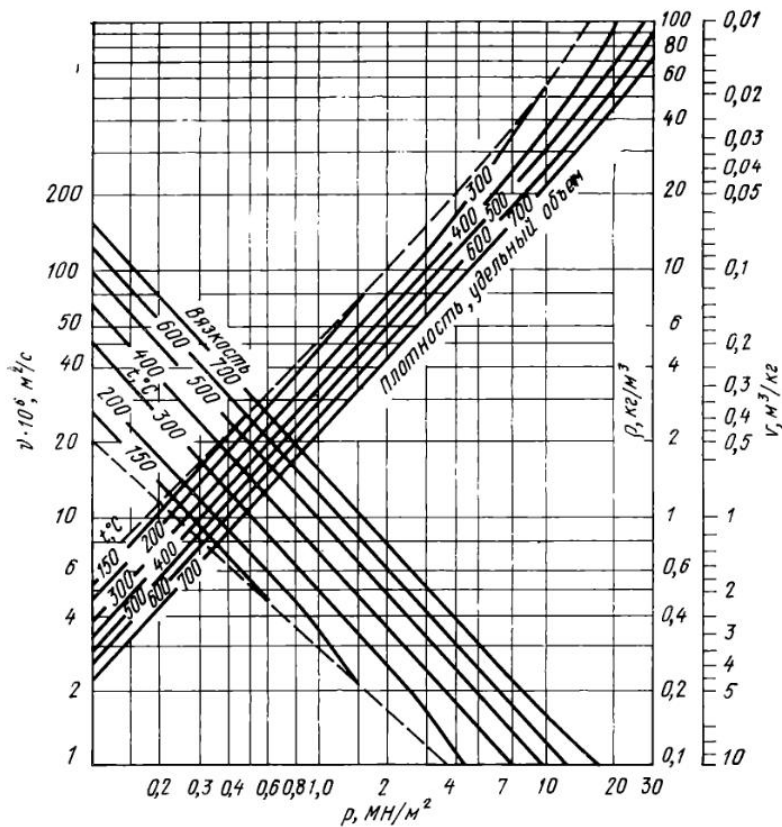


Рис. 9. Зависимость плотности ρ , удельного объема v и кинематической вязкости ν водяного пара от удельного давления p

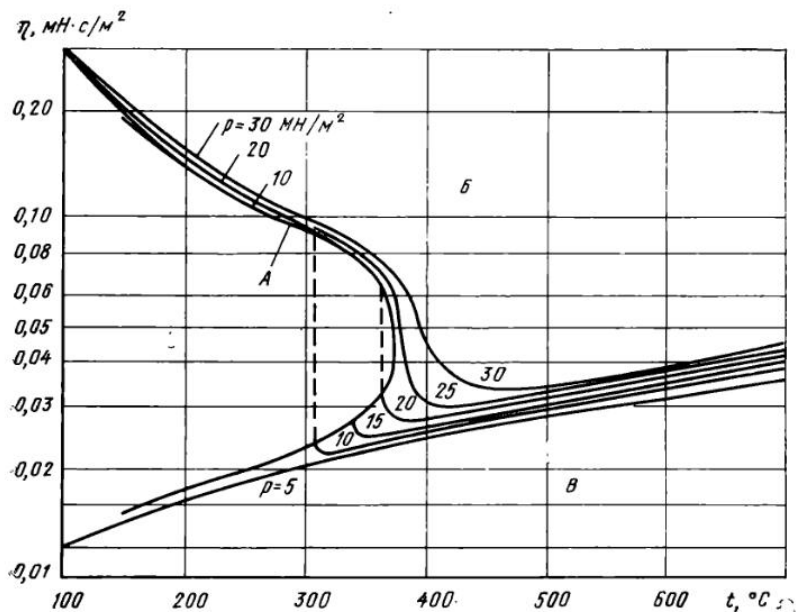


Рис. 10. Зависимость коэффициента вязкости η воды и водяного пара от температуры t :

A — кривая насыщения; B — область воды; B — область перегретого пара

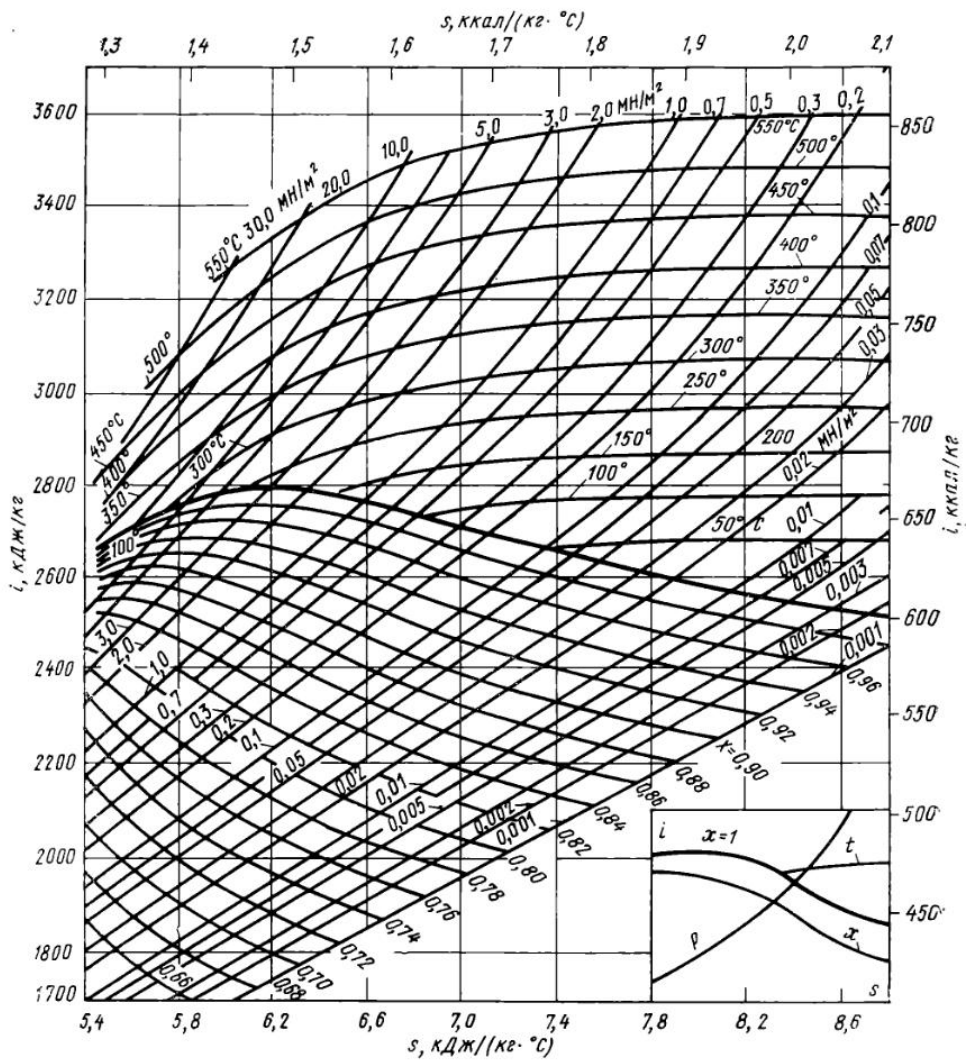


Рис. 11. Диаграмма $s-i$ водяного пара

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Таблица II-1

Некоторые физические параметры жидкостей

Наименование	$t, ^\circ\text{C}$	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент объемного расширения $\beta \cdot 10^4, 1/^\circ\text{C}$	Теплоем- кость c , кДж/(кг·°C)	Коэффициент теплопровод- ности λ , Вт/(м·°C)	Коэффициент вязкости $\eta \cdot 10$, Н·с/м ²
Азотная кислота	20	1512	—	1,72	—	—
Анилин	0	1037	85	2,02	0,186	10,2
Ацетон	0	813	—	2,114	0,174	0,395
Бензин	0	900	—	1,80	0,145	—
Бензол	0	900	124	1,67	0,15	0,76 (10)
Вода дистиллированная	4	1000	15	4,187	0,55	—
Глицерин безводный	0	1260	53	2,43	0,277	12100
Касторовое масло	0	—	—	—	0,184	2440 (10)
Ксилол	0	880	—	1,72 (20)	0,137	—
Керосин	0	850	—	2,43	0,121	—
Льняное вареное масло	15	940	—	—	—	—
Машинное масло	—	—	—	1,67	—	—
Мазут	32	—	—	—	0,118	—
Медный купорос (15% CuSO ₄ · ·5H ₂ O)	15	1100	—	—	—	—
Минеральное смазочное масло	20	890—930	—	0,662	0,104	—
Едкий натр (66% NaOH)	15	1700	—	—	—	—
Нефтяное масло	20	890	—	2,43	0,104	—
Ртуть чистая	0	13600	—	0,138	8,14—10,5	—
Спирт бутиловый	0	810	—	—	—	5,19
Спирт изопропиловый	0	—	—	—	—	4,60
Спирт метиловый	0	810	122	2,47	0,214	0,817
Спирт этиловый	0	806	110	2,303	0,188	1,78
Серная кислота	20	1834	57	1,386	—	—
7,5%-ная H ₂ SO ₄	15	1050	—	—	0,391	—
87%-ная H ₂ SO ₄	15	1800	—	—	0,372	—
Сернистая кислота сгущенная	—20	1490	—	1,339	—	—
Смоляное масло	15	960	—	—	—	—
Соляная кислота	20	—	—	3,098	—	—
10%-ная HCl	15	1050	—	—	—	—
Смола	80	1200	—	—	0,139	—
Скипидар	0	—	94	1,716	0,127 (15)	—
Уксусная кислота	0	1049	—	2,135	0,177	1,24
Эфир	30	—	163	2,261	0,139	—

Примечание. В скобках указана температура

Таблица II-2

Физические параметры трансформаторного масла в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{кДж/}$ $(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\lambda, \text{Вт/}$ $(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\eta \cdot 10^4, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\alpha \cdot 10^4, \text{м}^2/\text{ч}$	P_r	$\beta \cdot 10^4, 1/^\circ\text{C}$
-20	904,6	1,432	0,1141	—	—	3,15	—	6,70
-10	898,6	1,491	0,1132	—	—	3,04	—	6,75
0,0	892,5	1,549	0,1124	70,5	629,6	2,93	866	6,80
10	886,4	1,620	0,1115	37,9	335,4	2,82	484	6,85
20	880,3	1,666	0,1106	22,5	198,1	2,72	298	6,90
30	874,2	1,729	0,1098	14,7	128,5	2,62	202	6,95
40	868,2	1,788	0,1089	10,3	89,3	2,53	146	7,00
50	862,1	1,846	0,1082	7,58	65,3	2,45	111	7,05
60	856,0	1,905	0,1072	5,78	49,5	2,37	87,8	7,10
70	850,0	1,964	0,1064	4,54	38,6	2,29	71,3	7,10
80	843,9	2,026	0,1056	3,66	30,8	2,22	59,3	7,20
90	837,8	2,085	0,1047	3,03	25,4	2,16	50,5	7,25
100	831,8	2,144	0,1039	2,56	21,3	2,10	43,9	7,30
110	825,7	2,202	0,1030	2,20	18,1	2,04	38,8	7,35
120	819,6	2,261	0,1022	1,92	15,7	1,98	34,9	7,40

Таблица II-3

Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{Вт/}(м\cdot^\circ\text{C})$, некоторых жидкостей в зависимости от температуры

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$						
	0	25	50	75	100	125	150
Анилин	0,186	0,181	0,177	0,172	0,168	0,162	0,159
Ацетон	0,174	0,169	0,163	0,157	0,151	—	—
Бензин	0,145	—	0,110	—	—	—	—
Бензол	0,151	0,144	0,138	0,131	0,126	0,119	—
Вазелиновое масло	0,126	0,123	0,122	0,121	0,119	0,117	0,116
Вода	0,551	0,613	0,648	0,671	0,683	0,686	0,684
Глицерин	0,277	0,279	0,283	0,286	0,288	0,292	0,295
Касторовое масло	0,184	0,80	0,177	0,175	0,171	0,167	0,165
Керосин	0,121	—	0,089	—	—	—	—
Ксилол	0,136	0,131	0,127	0,121	0,117	0,113	—
Муравьиная кислота	0,261	0,256	0,251	0,247	—	—	—
Нитробензол	0,154	0,150	0,147	0,143	0,139	0,136	—
Спирт бутиловый	0,156	0,152	0,148	0,144	—	—	—
Спирт изопропиловый	0,154	0,150	0,145	0,142	—	—	—
Спирт метиловый	0,214	0,211	0,207	0,205	—	—	—
Спирт этиловый 96%	0,188	0,184	0,177	0,171	—	—	—
Толуол	0,142	0,136	0,129	0,123	0,119	0,122	—
Уксусная кислота	0,177	0,171	0,166	0,162	—	—	—

Т а б л и ц а II-4

Коэффициент теплопроводности жидкостей в зависимости от температуры

Наименование	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
Аммиак	0—100	0,539—0,313
Водный раствор аммиака 26%-ный	20—60	0,451—0,501
Диэтиленгликоль	0—100	0,202—0,214
Дихлордиформетан	{ -7—+15	0,098—0,092
	{ 15—82	0,092—0,066
Дихлорметан	-15—+30	0,192—0,168
Дизельное топливо (летнее)	10—130	0,131—0,117
Натрий	100	84,8
Натрий	210	79,6
Нефтяной эфир	30—75	0,130—0,127
Нитробензол	0—125	0,154—0,136
Октан (n)	0—100	0,149—0,137
Паральдегид	30—100	0,145—0,135
Парафин ($\rho=880 \text{ кг}/\text{м}^3$)	{ 0—100	0,126
	{ 200	0,124
Пентан (n)	-200—+100	0,169—0,124
Серная кислота:		
90%-ная	30	0,363
60%-ная	30	0,433
30%-ная	30	0,530
Серный ангидрид	-20—+30	0,223—0,193
Спирт амиловый	0—100	0,166—0,154
Спирт:		
изоамиловый	0—100	0,151—0,147
этиловый, 100%-ный	0—80	0,186—0,175
» 97%-ный	0—75	0,189—0,172
» 80%-ный	0—80	0,191—0,319
» 60%-ный	0—80	0,251—0,381
» 40%-ный	0—80	0,349—0,483
» 20%-ный	0—80	0,448—0,579
Трихлорэтилен	50	0,138
Трихлорэтан β	50	0,134
Хлористый натрий:		
12,5%-ный	30	0,588
25%-ный	30	0,569
Хлористый кальций:		
15%-ный	30	0,588
30%-ный рассол	30	0,554
Хлористый метил	-20—+30	0,195—0,154
Углекислота:		
$\rho=58,9 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^2$	10—20	0,101—0,884
$\rho=88,2 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^2$	10—30	0,107—0,083

Примечания: 1. Первое значение λ относится к нижнему пределу t , второе — к верхнему.
2. В пределах значений t , указанных в таблице, допускается линейная интерполяция.
3. Составы приведены в % по массе.

Т а б л и ц а II-5

Теплоемкость некоторых жидких веществ

Наименование	Теплоемкость, кДж/(кг·°C)	Температура определения теплоемкости, °C	Наименование	Теплоемкость, кДж/(кг·°C)	Температура определения теплоемкости, °C
Азот	1,80	От -208 до -196	Масло:		
Бензол	1,42	19—30	касторовое	2,09	20
Водород	25,1	-253	оливковое	1,97	7
Газолин	2,22		МК	1,72	20
Керосин	2,14	18	парафиновое	2,18	20—60
Кислород	1,47	От -200 до -183	Морская вода	3,94	17
			Сероуглерод	1,00	18

Таблица II-6

Теплоемкость c_p воды при $\rho = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$

$t, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$
0	4,2178	35	4,1780	70	4,1897
5	4,2023	40	4,1784	75	4,1927
10	4,1922	45	4,1793	80	4,1964
15	4,1859	50	4,1805	85	4,2006
20	4,1818	55	4,1822	90	4,2052
25	4,1797	60	4,1843	95	4,2102
30	4,1784	65	4,1868	100	4,2161

Таблица II-7

Истинная теплоемкость c водных растворов различных концентраций для некоторых веществ

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$						
6 20 33 57	Раствор NaCl, % (по массе)						
	0,8	3,2	7,5	24,5			
	—	4,02	3,81	3,37			
	4,14	4,06	3,83	3,39			
	—	4,06	3,83	3,39			
	—	—	3,86	3,43			
	Раствор NaOH, % (по массе)						
	1,1	2,2	18,2	30,8	47,0	57,2	
	20	4,124	4,06	3,496	3,35	3,282	3,274
	Раствор KOH, % (по массе)						
1,6	4,9	13,5	23,7				
20	4,09	3,89	3,408	3,14			
Раствор HCl, % (по массе)							
16,8	28,9	33,6	41,4				
0	3,01	2,55	2,43	2,3			
10	3,01	2,53	2,41	—			
20	3,09	2,64	2,47	—			
40	3,14	2,70	2,57	—			
60	3,27	2,81	2,67	2			

Таблица II-8

Истинные c и средние c_{cp} теплоемкости NH_4HSO_4 и $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, кДж/(кг·°C)

$t, ^\circ\text{C}$	c	c_{cp}	c	c_{cp}
NH_4HSO_4			$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	
0	1,168	1,168	1,365	1,365
25	1,243	1,206	1,419	1,394
50	1,315	1,243	1,474	1,424
75	1,390	1,277	1,524	1,453
100	1,461	1,315	1,578	1,482
125	1,537	1,352	1,633	1,511
144	1,591	1,382 (тв.)	—	—
144	1,717	2,244 (ж.)	—	—
150	—	—	1,687	1,537
175	1,800	2,160	1,738	1,566
200	1,876	2,123	1,792	1,595
225	1,938	2,098	1,846	1,624
250	2,005	2,085	1,897	1,654
275	2,077	2,081	1,951	1,683
300	2,135	2,085	2,005	1,708
325	2,211	2,089	2,059	1,738
350	2,278	2,102	2,110	1,767
359	—	Разложение	—	—
366,6	—	—	—	Разложение

Примечания: 1. Уравнения для расчета истинной теплоемкости NH_4HSO_4 : в интервале от 0 до 144°C $c=41,87+0,339 T$ кДж/(кмоль·°C); в интервале от 144 до 350°C $c=67,24+0,313 T$ кДж/(кмоль·°C).

2. Теплота плавления 14320 кДж/кмоль; тв. — твердое состояние; ж — жидкое состояние.

3. Уравнение для расчета истинной теплоемкости $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ в интервале от 0 до 350°C $c=180,6+0,2816T$ кДж/(кмоль·°C).

Таблица II-9

Истинные c и средние c_{cp} теплоемкости K_2SO_4 , кДж/(кг·°C)

$t, ^\circ\text{C}$	c	c_{cp}	$t, ^\circ\text{C}$	c	c_{cp}
0	0,712	0,712	650	1,089	1,063
50	0,775	0,754	700	1,114	1,068
100	0,825	0,778	750	1,139	1,076
150	0,871	0,799	800	1,164	1,080
200	0,913	0,821	850	1,185	1,084
250	0,950	0,842	900	1,209	1,089
300	0,984	0,862	950	1,235	1,097
350	1,017	0,879	1000	1,260	1,101
400	1,055	0,900	1069	1,289	1,109
450	1,084	0,921	1069	—	1,306 (ж)
500	1,118	0,942	1100	—	1,302
583	1,172	0,976 (α)	1200	1,139	1,294
583	1,055	1,055 (β)	1300	—	1,298
600	1,063	1,059	1500	—	1,273

Примечания: 1. (α) и (β) — фазовые состояния; (ж) — жидкое состояние.

2. Уравнения для расчета истинной теплоемкости: в интервале от 0 до 583°C $c=114,93+1,069T - \frac{1,475 \cdot 10^6}{T^2}$ кДж/(кмоль·°C); в интервале от 583 до 1069°C $c=112,3+0,094 T$ кДж/(кмоль·°C); в интервале от 1069 до 1500°C $c=198,2$ кДж/(кмоль·°C).

Некоторые теплофизические данные для K_2SO_4

Уравнения для определения энтальпии:
в интервале от 0 до 583°C

$$i = 114,93 T + 0,05345 T^2 + \frac{1,475 \cdot 10^6}{T} - 40727 \text{ кДж/кмоль};$$

в интервале от 583 до 1069°C

$$i = 112,3 T + 0,4211 T^2 - 19156 \text{ кДж/кмоль};$$

в интервале от 1069 до 1500°C

$$i = 198,2 T - 21600 \text{ кДж/кмоль}.$$

Тепловой эффект $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращения равен 8130 кДж/кмоль.

Теплота плавления 36700 кДж/кмоль.

Таблица II-10

Истинные c и средние $c_{\text{ср}}$ теплоемкости солей NaCl, KCl, $MgCl_2$ и $CaSO_4$, кДж/(кг·°C)

$t, ^\circ\text{C}$	NaCl		KCl		$MgCl_2$		$CaSO_4$	
	c	$c_{\text{ср}}$	c	$c_{\text{ср}}$	c	$c_{\text{ср}}$	c	$c_{\text{ср}}$
0	0,854	0,854	0,674	0,674	0,791	0,791	0,691	0,691
50	0,871	0,862	0,687	0,682	0,799	0,795	—	—
100	0,889	0,871	0,699	0,687	0,812	0,799	0,787	0,741
150	0,900	0,879	0,716	0,695	0,825	0,808	—	—
200	0,917	0,888	0,729	0,699	0,837	0,812	0,867	0,783
250	0,929	0,892	0,741	0,708	0,849	0,816	—	—
300	0,946	0,900	0,754	0,716	0,858	0,825	0,942	0,825
350	0,959	0,909	0,766	0,720	0,871	0,829	—	—
400	0,976	0,917	0,783	0,729	0,887	0,837	1,013	0,862
450	0,992	0,921	0,795	0,733	0,886	0,842	—	—
500	1,005	0,929	0,808	0,741	0,909	0,849	1,084	0,900
550	1,022	0,938	0,821	0,749	0,921	0,854	—	—
600	1,034	0,946	0,833	0,754	0,929	0,856	1,151	0,938
650	1,051	0,955	0,849	0,762	0,942	0,867	—	—
700	1,068	0,959	0,862	0,766	0,955	0,871	1,223	0,971
750	1,080	0,967	0,875	0,775	—	—	—	—
800	1,097	0,976	—	—	—	—	1,289	1,009
900	—	—	—	—	—	—	1,361	1,043
1000	—	—	—	—	—	—	1,428	1,080
1100	—	—	—	—	—	—	1,495	1,114

Примечание. Уравнения для расчета теплоемкостей:
для NaCl

$$c = 0,854 + 3,015 \cdot 10^{-4} t \text{ кДж/(кг·°C)},$$

$$c_{\text{ср}} = 0,854 + 1,508 \cdot 10^{-4} t \text{ кДж/(кг·°C)}$$

для KCl

$$c = 0,674 + 26,8 \cdot 10^{-5} t \text{ кДж/(кг·°C)},$$

$$c_{\text{ср}} = 0,674 + 13,4 \cdot 10^{-5} t \text{ кДж/(кг·°C)};$$

для $MgCl_2$

$$c = 0,79 + 2,34 \cdot 10^{-4} t \text{ кДж/(кг·°C)};$$

$$c_{\text{ср}} = 0,79 + 1,17 \cdot 10^{-4} t \text{ кДж/(кг·°C)};$$

для $CaSO_4$

$$c = 77,57 + 91,95 \cdot 10^{-3} T - 6,568 \cdot 10^4 T^{-2} \text{ кДж/(кг·°C)}.$$

Точность $\pm 5\%$ при 0—1100°C.

Таблица II-11

Температура и теплота плавления солей NaCl, KCl, $MgCl_2$

Соль	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{пл}}, \text{кДж/кмоль}$
NaCl	800	28470 \pm 400
KCl	790	26790
$MgCl_2$	712	40440 \pm 1200

Таблица II-12

Теплофизические характеристики селитряной смеси*

$t, ^\circ\text{C}$	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)	Коэффициент вязкости $\eta \cdot 10^4$, Н·с/м ²	Удельная энтальпия i , кДж/кг	Критери- Прандтля
150	1976	0,441	177,7	337,9	57,4
160	1967	0,439	146,6	352,1	47,5
170	1959	0,438	122,9	366,3	39,9
180	1951	0,437	104,7	380,6	34,1
190	1943	0,436	90,3	394,8	29,5
200	1934	0,435	78,9	409,1	25,8
210	1926	0,434	69,5	423,3	22,8
220	1919	0,433	61,9	437,5	20,4
230	1911	0,430	55,6	451,8	18,4
240	1903	0,428	50,2	465,9	16,7
250	1895	0,426	45,7	480,2	15,3
260	1887	0,419	41,9	494,5	14,2
270	1879	0,413	38,5	508,7	13,3
280	1871	0,407	35,6	522,9	12,4
290	1864	0,400	33,1	537,2	11,8
300	1856	0,393	30,9	551,4	11,2
310	1849	0,387	29,0	565,6	10,7
320	1841	0,381	27,2	579,9	10,1
330	1834	0,375	25,7	594,1	9,76
340	1826	0,369	24,3	608,3	9,39
350	1819	0,362	23,1	622,6	9,11
360	1812	0,356	21,9	636,8	8,74
370	1804	0,349	20,9	651,1	8,52
380	1797	0,343	20,0	665,3	8,30
390	1790	0,336	19,1	679,5	8,10
400	1783	0,330	18,3	693,8	7,91
410	1776	0,323	17,6	707,9	7,76
420	1769	0,317	16,97	722,2	7,60
430	1762	0,311	16,36	736,5	7,50
440	1744	0,305	15,79	750,7	7,37
450	1748	0,298	15,26	764,9	7,29
460	1741	0,292	14,78	779,2	7,20
470	1734	0,285	14,33	793,4	7,16
480	1728	0,279	13,91	807,6	7,09
490	1721	0,272	13,50	821,9	7,06
500	1715	0,266	13,13	836,1	7,02
510	1708	0,259	12,78	850,3	7,01
520	1701	0,254	12,46	864,6	7,00
530	1695	0,248	12,15	878,8	7,00
540	1688	0,241	11,87	892,6	7,00
550	1681	0,235	11,58	906,9	7,00

* Состав смеси: 40% NaNO₂; 53% KNO₃; 7% NaNO₃; $t_{пл} = 148^\circ\text{C}$.

Таблица II-13

Зависимость физических свойств жидких металлов и сплавов от температуры

Упругость паров		Плотность		Теплоемкость		Вязкость		Теплопроводность		Удельное электрическое сопротивление		Поверхностное натяжение		Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, %
$t, ^\circ\text{C}$	$\kappa\text{H}/\text{M}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{r}/\text{cm}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{мН}\cdot\text{с}/\text{M}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{э}}, \text{мКОМ}\cdot\text{см}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{мДж}/\text{M}^2$	
Алюминий														
1537	0,133	660	2,380	660	—	—	—	—	—	657	19,6	750	520	6,6
1770	1,333	700	2,369	—	—	—	—	—	—	670	20,5	—	—	—
2081	13,33	900	2,315	—	1,081	700	2,90	700	104	735	21,3	—	—	—
—	26,66	1100	2,261	—	—	800	1,40	790	122	807	22,4	—	—	—
2360	53,32	—	—	1000	—	—	—	—	—	870	23,2	—	—	—
Висмут														
917	0,133	300	10,03	271	0,142	304	1,66	300	17,1	300	128,9	300	376	-3,32
1067	1,333	400	9,91	400	0,148	451	1,28	400	15,5	400	134,2	350	373	—
1257	13,33	600	9,66	600	0,158	600	0,99	500	15,5	600	145,25	400	370	—
1325	26,66	802	9,40	800	0,166	—	—	600	15,5	750	153,53	450	367	—
1400	53,32	962	9,20	1000	0,175	—	—	700	15,5	—	—	500	363	-3,1
Галлий														
1315	0,133	32,38	6,093	12,5	—	52,9	1,89	—	29,4	29,75	25,9	30	—	—
1497	1,333	301	5,905	—	0,343	301	1,03	$t_{\text{пл}}$	—	30,3	27,2	—	735	—
1726	13,33	600	5,720	—	—	402	0,88	—	—	46,1	28,4	—	—	—
1807	26,66	806	5,604	—	—	500	0,81	—	—	—	—	—	—	—
1895	53,32	1100	5,445	200	—	806	0,65	—	37,6	—	—	40	—	—
Золото														
1869	0,133	1100	17,24	1063	—	—	—	—	—	1100	31,4	1120	1128	5,195
2154	1,333	1200	17,12	—	0,148	—	—	—	—	1200	32,76	—	—	—
2521	13,33	1300	17,00	—	—	—	—	—	—	1300	34,17	—	—	—
2657	26,66	—	—	—	—	—	—	—	—	1400	35,58	—	—	—
2808	53,52	—	—	1300	—	—	—	—	—	1500	37,00	—	—	—

Упругость паров		Плотность		Теплоемкость		Вязкость		Теплопроводность		Удельное электрическое сопротивление		Поверхностное натяжение		Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, %						
$t, ^\circ\text{C}$	кг/м^3	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{сН}\cdot\text{с/м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_s, \text{мкОм}\cdot\text{см}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{мДж/м}^2$							
Индий																				
1249	0,133	164	7,026	156,4	0,274	—	—	37,6	—	—	29,10	170	340	2,5						
1466	1,333	194	7,001	—	—	—	—				30,11	—		—	—	—	—	—		
1766	13,33	228	6,974	—	—	—	—				31,87	—		—	—	—	—	—		
1863	26,66	271	6,939	—	—	—	—				34,84	—		—	—	—	—	—		
1982	53,32	300	6,916	—	—	—	—	50,2	—	—	—	250	—	—						
Кадмий																				
394	0,133	330	0,01	321	0,265	350	2,37	44,5	—	—	33,7	330	564	4,74						
484	1,333	350	7,99			400	2,16				358	330			370	608				
611	13,33	400	7,93			500	1,84				380	34,12			420	598				
658	26,66	500	7,82			600	1,54				435	34,82			450	611				
711	53,32	600	7,72	700	0,267	—	—	50,0	—	700	35,78	500	600	—						
Калий																				
342	0,133	100	0,819	75	0,817	69,6	0,515	45,0	—	—	13,16	100	86	—						
443	1,333	250	0,783	200	0,789	167,4	0,330				18,70				—	—	—	—	—	—
581	13,33	400	0,747	400	0,763	250	0,259				40,0				—	—	—	—	—	—
635	26,66	550	0,711	600	0,763	400	0,191				37,6				—	—	—	—	—	—
696	53,32	700	0,676	800	0,788	700	0,136	35,5	—	—	—	150	—	—						
Литий																				
745	0,133	200	0,507	200	4,187	183,4	0,593	—	—	—	45,27	—	—	1,5						
890	1,333	400	0,490	600	4,187	193,2	0,574				—				—	—	—	—	—	—
1084	13,33	600	0,474	1000	4,187	208,1	0,554				37,7				—	—	—	—	—	—
1156	26,66	800	0,457	—	—	250,8	0,493				—				—	—	—	—	—	—
1236	53,32	1000	0,441	—	—	285,5	0,456	—	—	—	—	—	—	—						

Уругость паров		Плотность		Теплоемкость		Вязкость		Теплопроводность		Удельное электрическое сопротивление		Поверхностное натяжение		Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, %
$t, ^\circ\text{C}$	$\kappa\text{H}/\text{M}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{мН}\cdot\text{с}/\text{м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_s, \text{мКОМ}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{мДж}/\text{м}^2$	
Магний														
621	0,133	651	1,572	651	1,325	—	—	—	—	—	—	—	—	—
702	1,333	678	1,55	727	1,345	—	—	—	—	—	—	681	563	4,2
909	13,33	700	1,536	927	1,390	—	—	—	—	—	—	894	502	—
967	26,66	720	1,51	1027	1,410	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1034	53,32	750	1,47	1120	1,430	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Натрий														
440	0,133	100	0,928	100	1,385	103,7	0,685	100	86,3	100	9,65	100	206,4	2,5
548	1,333	250	0,891	200	1,339	167,6	0,504	200	82,0	200	13,18	250	199,5	—
696	13,33	400	0,854	400	1,281	250	0,381	300	76,0	250	14,90	—	—	—
752	26,66	550	0,817	600	1,254	400	0,270	400	71,7	300	16,70	—	—	—
815	53,32	700	0,780	800	1,263	700	0,182	500	67,1	350	18,44	—	—	—
Олово														
1492	0,133	409	6,834	250	0,243	240	0,192	240	33,6	231,9	47,6	300	526	2,6
1703	1,333	523	6,761	—	—	300	0,166	292	34,0	400	51,4	350	522	—
1968	13,33	574	6,729	—	—	400	0,138	417	38,1	600	56,8	400	518	—
2063	26,66	648	6,721	—	—	500	0,118	498	32,8	800	62,7	450	514	—
2169	53,32	704	6,640	1100	0,316	600	0,105	—	—	1000	68,6	500	510	—
Ртуть														
126,2	0,133	—20	13,645	0	0,1388	—20	1,86	0	8,22	50	98,4	20	465	3,6
184,0	1,333	20	13,546	100	0,1373	0	1,68	60	9,70	100	103,2	112	454	—
261,7	13,33	100	13,352	200	0,1355	20	1,55	120	11,0	200	114,2	200	436	—
290,7	26,66	200	13,115	300	0,1351	100	1,21	160	11,6	300	127,5	300	405	—
323,0	53,32	300	12,881	450	0,1362	200	1,01	220	12,7	350	135,5	394	364	—
Рубидий														
294	0,133	39,0	1,475	39	0,382	38	0,673	$t_{пл}$	29,4	50	23,15	—	—	2,5
387	1,333	—	—	—	—	50	0,625	$t_{пл}$	—	75	25,32	—	—	—
519	13,33	—	—	—	—	99,7	0,484	$t_{пл}$	—	100	27,47	—	—	—
569	26,66	—	—	—	—	140,5	0,414	$t_{пл}$	—	—	—	—	—	—
628	53,32	—	—	126	—	220,1	0,324	50	32,6	—	—	—	—	—

Продолжение табл. II-13

Упругость паров		Плотность		Теплоемкость		Вязкость		Теплопроводность		Удельное электрическое сопротивление		Поверхностное натяжение		Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, %
$t, ^\circ\text{C}$	$\kappa\text{H}/\text{M}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{мН}\cdot\text{с}/\text{M}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{M}\cdot^\circ\text{C})$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{э}, \text{мКОм}\cdot\text{см}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{мДж}/\text{M}^2$	
Свинец														
987	0,133	400	10,51	327	0,163	441	2,11	390	16,3	327	94,6	550	442	3,6
1167	1,333	500	10,39	400	0,155	456	2,06	400	15,9	400	98,0	400	438	—
1417	13,33	600	10,27	500	0,155	551	1,70	500	15,5	600	107,2	450	438	—
1508	26,66	800	10,04	—	—	103	1,37	600	15,0	800	116,4	500	431	—
1611	53,32	1000	9,81	—	—	844	1,19	700	15,0	1000	125,7	—	—	—
Серебро														
1357	0,133	960,5	9,3	960,5	—	1200	0,294	—	—	1000	17,0	995	923	4,99
1575	1,333	1000	9,26	—	—	—	—	—	—	1100	18,2	—	—	—
1865	13,33	1092	9,20	—	0,290	—	—	—	—	1200	19,4	—	—	—
1971	26,66	1195	9,10	—	—	—	—	—	—	1300	20,5	—	—	—
2090	53,32	1300	9,00	1300	—	—	—	—	—	1340	21,0	—	—	—
Сурьма														
886	0,133	640	6,49	650	—	702	1,30	630	21,8	627	117,00	635	383	0,94
1033	1,333	700	6,45	—	—	801	1,11	700	—	700	117,65	676	384	—
1223	1333	800	6,38	—	0,275	900	0,99	800	—	800	120,31	725	383	—
1288	26,66	970	6,29	—	—	1002	0,90	730	21,8	850	123,54	800	380	—
1364	53,32	—	—	950	—	—	—	900	—	900	131,00	—	—	—
Таллий														
825	0,133	306,5	11,289	303	—	—	—	350	24,7	303	74,0	327	401	3,2
983	1,333	326,7	11,254	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1196	13,33	3300	11,250	—	0,1537	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1274	26,66	333,5	11,254	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1364	53,32	—	—	500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Цезий														
278	0,133	28	1,84	28,5	0,251	43,4	0,63	$t_{пл}$	18,4	30	36,6	—	—	2,6
387	1,333	—	—	—	—	99,6	0,475	—	—	37	37,0	—	—	—
570	13,33	—	—	—	—	140,5	0,405	—	—	—	—	—	—	—
570	26,66	—	—	—	—	168,0	0,385	—	—	—	—	—	—	—
635	53,32	—	—	—	—	210,9	0,344	—	—	—	—	—	—	—

Упругость паров $t, ^\circ\text{C}$	кН/м ²	Плотность		Теплоемкость		Вязкость		Теплопроводность		Удельное электрическое сопротивление		Поверхностное натяжение		Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, %
		$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{мН}\cdot\text{с/м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_e, \text{мКОм}\cdot\text{см}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{мДж/м}^2$	

Цинк

487	0,133	419,5	6,92	419,5	0,501	450	0,317	500	58,0	419,5	35,3	510	785	6,9
593	1,333	600	6,81	600	0,490	500	0,278	600	57,2	500	35,4	550	778	—
736	13,33	800	6,57	800	0,450	600	0,224	700	56,9	600	35,0	600	768	—
788	26,66	—	—	900	0,437	700	0,188	—	—	700	35,65	640	761	—
Сплав натрия с калием, близкий к эвтектике, 22% (вес.) Na и 78% (вес.) K														
382	0,133	100	0,886	100	1,123	103,7	0,546	100	25,9	50	33,0	$t_{\text{пл}}$	110—100	—
490	1,333	250	0,850	300	1,068	167,5	0,411	200	26,6	100	35,5	—	—	—
638	13,33	400	0,814	500	1,041	250	0,316	300	27,2	150	38,0	—	—	2,5
696	26,66	550	0,778	600	1,040	400	0,320	400	27,7	200	41,0	—	—	—
760	53,32	700	0,742	800	1,060	700	0,161	500	28,4	—	—	250	—	—

Сплав натрия с калием, 56% (вес.) Na и 44% (вес.) K

355	0,133	100	0,847	0	0,995	103,7	0,468	100	24,4	50	37,5	$t_{\text{пл}}$	—	—
458	1,333	250	0,811	200	0,910	167,5	0,361	400	26,6	100	41,0	—	—	—
603	13,33	400	0,775	400	0,878	250	0,280	—	—	150	44,0	—	—	2,5
659	26,66	550	0,739	600	0,877	400	0,205	—	—	200	47,0	—	—	—
721	53,32	700	0,703	800	0,889	700	0,146	—	—	—	—	250	—	—

Сплав свинца с висмутом эвтектический, 44,5% (вес.) Pb и 55,5% (вес.) Bi

—	—	200	10,46	144	0,170	332	0,170	160	10,9	200	113	800	367	0,0
—	—	400	10,19	—	0,138	450	0,138	200	9,27	300	118	1000	356	—
—	—	600	9,91	—	0,146	500	0,130	240	9,65	400	123	—	—	—
—	—	800	9,64	—	0,123	550	0,123	300	10,1	500	128	—	—	—
—	—	1000	9,36	358	0,117	600	0,117	320	11,35	—	—	—	—	—

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ, МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

Т а б л и ц а III-1

Физические свойства твердых веществ (элементов) при 0°С

Химический элемент	Атомная масса- со	ρ , г/см ³	$\beta \cdot 10^6$, 1/°С	$t_{пл}$, °С	$t_{кип}$, °С	$Q_{пл}$, кДж/кг	c_p , кДж/(кг·°С)	λ , м·°С	$\rho \cdot 10^6$, Ом·см	$\alpha \cdot 10^6$, м/м ²
Алюминий (Al)	26,9815	2,70	22,9	660,1	2000	385,18	0,896	209,3	2,62	3,2
Барий (Ba)	137,34	3,76	—	704	1700	—	0,285	—	—	—
Бериллий (Be)	9,0122	1,84	10,5	1280	1500	1088,57	1,675	157,0	5,7	183,5
Бор (B)	10,811	2,34	8	2300	2550	1109,50	1,285	—	0,8	—
Ванадий (V)	50,942	5,9	—	1720	3000	334,94	0,494	34,9	19	43
Висмут (Bi)	208,980	9,83	13,3	271	1500	54,43	0,121	9,4	111	28,4
Вольфрам (W)	183,85	19,34	4,3	3380	4730	255,39	0,134	168,6	5,00	234
Галлий (Ga)	69,72	5,97	18,1	29,8	2300	79,55	0,343	32,6	53	57,2
Железо (Fe)	55,847	7,88	11,3	1535	3000	267,96	0,439	74,4	9,0	77,3
Золото (Au)	196,967	19,31	14,15	1063	2600	66,15	0,129	312,8	2,19	447
Иод (I)	126,9044	4,93	93	1135	185	65,98	0,218	0,418	—	—
Иридий (Ir)	192,2	22,5	6,5	2443	4900	117,23	0,126	60,0	4,85	74,8
Кадмий (Cd)	112,40	8,66	29,0	320,9	765	52,34	0,230	93,1	6,5	168
Калий (K)	39,102	0,87	84	63,5	759	61,13	0,737	100,0	6,1	560
Кальций (Ca)	40,08	1,54	25	851	1400	328,66	0,657	—	—	—
Кобальт (Co)	58,9332	8,8	12,0	1492	3200	272,14	0,448	69,8	5,5	63,6
Кремний (Si)	28,086	2,33	2,4	1410	2350	—	0,712*1	83,7	—	—
Литий (Li)	6,939	0,534	60	186	1400	665,70	3,308	68,6	8,55	145
Магний (Mg)	24,312	1,76	25,1	650	1120	209,34	0,976	158,2	4,2	305
Марганец (Mn)	54,9381	7,40	24	1250	1900	263,77	0,431	157,0	265	177
Медь (Cu)	63,54	8,93	16,7	1083	2300	213,53	0,385	389,6	1,55	405
Молибден (Mo)	93,94	10,2	5,1	2600	3500	200,97	0,251	140,7	5,15	196
Мышьяк (As)	74,9216	5,72	5,0	830	625	—	0,343	—	—	—
Натрий (Na)	22,9898	0,975	72	97,6	878	115,14	1,197	109,3	—	340
Неолим (Nd)	144,24	7,0	—	840	—	—	0,188*2	—	—	—

Химический элемент	Атомная масса	ρ , г/см ³	$\beta \cdot 10^6$, 1/°C	$t_{пл}$, °C	$t_{кип}$, °C	$Q_{пл}$, кДж/кг	c_p , кДж/(кг·°C)	λ_0 , Вт/(м·°C)	$\rho_0 \cdot 10^6$, Ом·см	$\alpha \cdot 10^6$, Мг/г
Никель (Ni)	58,71	8,9	13,4	1453	3075	301,45	0,427	67,5	6,5	64
Нюбий (Nb)	92,906	8,5	7,06	1950	3700	—	0,268	47,7	14	75,5
Олово (Sn)	118,69	7,3	21	231,9	2275	58,62	0,222	66,3	11	148
Осмий (Os)	190,2	22,48	6,1	2500	5300	—	0,129	—	—	—
Палладий (Pd)	106,4	12,0	11,8	1555	3800	150,72	0,239	70,9	—	88
Платина (Pt)	195,09	21,46	8,95	1769	4000	104,67	0,129	69,8	9,8	88,5
Рений (Re)	186,20	20,5	12,45	3150	5870	—	0,133	21,1	—	—
Родий (Rh)	102,905	12,44	7,85	1960	4500	217,71	0,243	89,6	4,3	106
Рубидий (Rb)	85,47	1,54	90	39	696	25,54	0,335	46,5	11,4	324
Свинец (Pb)	207,19	11,35	28,3	327,3	1750	23,03	0,126	35,1	19,0	87,5
Селен (Se)	78,96	4,4	37	220	688	66,66	0,352*1	0,291	1,2*4	—
Сера (S):										
ромбическая	32,064	2,06	74	112,8	444,6	39,36	0,733	0,209	—	—
монокристаллитная	32,064	1,96	80	119,0	—	46,05	—	—	—	—
Серебро (Ag)	107,870	10,50	19,49	960,5	2100	104,67	0,234	418,7	1,50	612
Сурьма (Sb)	121,75	6,69	9,2	630,5	1640	163,29	0,205	18,8	36,3	49,5
Таллий (Tl)	204,37	11,85	28	302,5	1450	20,93	0,134*3	37,2	18	—
Тантал (Ta)	180,948	16,6	6,5	3000	5300	154,91	0,138	54,7	13,1	—
Теллур (Te)	127,60	6,24	16	452	1390	29,31	0,201*3	25,1	0,3	—
Титан (Ti)	47,90	4,54	7,7	1800	3400	376,81	0,532	15,1	56	22,4
Торий (Th)	232,038	11,7	11	1827	3526	—	0,117	—	13*1	—
Углерод (C):										
алмаз	12,01115	13,51	0,91	3540	4000	—	—	629	—	—
графит	12,01	1,7—2,3	7,9	3540	4000	—	0,669	174,5	2000	440
Уран (U)	238,03	19,1	23	1133	3927	—	0,117	19,2	30,6	30,9
Фосфор (P)	30,975	1,82	125	44,1	280	21,77	—	—	—	—
Хром (Cr)	51,996	7,15	5,9	1830	2300	316,10	0,448	69,8	14,5	78,5
Цезий (Cs)	132,905	1,87	97	28	670	15,91	0,201	20,9	78	—
Церий (Ce)	140,12	6,8	—	815	1400	—	0,209*1	—	—	—
Цинк (Zn)	65,37	7,15	30	419,5	905,7	104,67	0,381	112,8	5,5	148
Цирконий (Zr)	91,22	6,53	6,3	1900	2900	251,21	0,276	—	41	—

*1 При 20°С. *2 При 18°С. *3 50°С. *4 При 200°С.

Таблица III-2

Теплофизические свойства металлов и сплавов

Металлы	ρ, кг/м³	С, кДж/ (кг·°С)	α·10⁶, м²/ч	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°С), при температуре, °С												
				-100	0	20	100	200	300	400	600	800	1000	1200		
Алюминий: чистый	2700	0,896	34,0	231,9	228,4	228	228,4	228,4	228,4	228,4	228,4	228,4	228,4	228,4	228,4	228,4
сплав Al—Cu (дюралюминий 94—96% Al; 3—5% Cu; следы Mg)	2800	0,883	24,0	126,3	159,2	164,5	181,7	183,9	183,9	183,9	183,9	183,9	183,9	183,9	183,9	183,9
сплав Al—Mg (91—95% Al; 5—9% Mg)	2600	0,904	17,3	93,4	108,9	112,5	126,3	141,9	141,9	141,9	141,9	141,9	141,9	141,9	141,9	141,9
сплав Al—Si (87% Al; 13% Si)	2660	0,871	25,8	148,9	162,8	163,9	174,5	184,9	184,9	184,9	184,9	184,9	184,9	184,9	184,9	184,9
сплав Al—Si (86,5% Al; 12,5% Si; 1% Cu)	2660	0,887	21,5	119,4	137,2	136,8	144,2	152,4	152,4	152,4	152,4	152,4	152,4	152,4	152,4	152,4
сплав Al—Si (78—80% Al; 20—22% Si)	2630	0,854	25,7	143,6	157,5	160,9	167,5	174,8	174,8	177,9	177,9	177,9	177,9	177,9	177,9	177,9
сплав Al—Mg—Si (97% Al; 1% Mg; 1% Si; 1% Mn)	2700	0,892	26,6	—	174,8	176,8	188,6	204,7	204,7	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8
Свинец	11350	0,129	8,6	36,9	35,1	34,7	33,4	31,5	31,5	—	—	—	—	—	—	—
Алюминиевая бронза (95% Cu; 5% Al)	8950	0,385	40,40	407,1	386,1	386,1	379,1	373,3	373,3	373,3	373,3	373,3	373,3	373,3	373,3	373,3
Бронза (75% Cu; 25% Sn)	8660	0,410	8,39	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Красная латунь (85% Cu; 9% Sn; 6% Zn)	8710	0,385	6,49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Латунь (70% Cu; 30% Zn)	8520	0,385	12,30	88,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Константан (60% Cu; 40% Ni)	8820	0,410	2,20	20,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Нейзильбер (62% Cu; 15% Ni; 22% Zn)	8613	0,394	2,69	18,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Магния (чистый)	1745	1,013	35,00	177,9	170,9	170,9	170,9	162,8	162,8	157,0	157,0	157,0	157,0	157,0	157,0	157,0
сплав Mg—Al (6—8% Al; 1—2% Zn)	1810	1,004	13,00	—	51,9	65,7	62,3	74,4	74,4	86,5	86,5	86,5	86,5	86,5	86,5	86,5
сплав Mg—Mn (2% Mn)	1809	1,004	23,00	93,5	110,7	114,2	124,6	130,3	130,3	—	—	—	—	—	—	—
Молибден	10214	0,252	19,3	138,4	137,2	137,2	137,2	137,2	137,2	—	—	—	—	—	—	—
Никель: чистый (99,9%)	8900	0,460	8,20	107,9	93,5	90,0	83,0	72,7	72,7	64,0	64,0	58,8	58,8	58,8	58,8	58,8
нечистый (99,2%)	8900	0,460	6,29	—	69,2	69,2	64,1	58,8	58,8	55,4	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9
сплав Ni—Cr (80% Ni; 10% Cr)	8660	0,460	1,20	—	17,1	17,3	18,8	20,9	20,9	22,8	22,8	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
сплав Ni—Cr (80% Ni; 20% Cr)	8310	0,460	1,20	—	12,3	12,7	13,8	15,6	15,6	17,1	17,1	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
Серебро: высокочистое	10520	0,252	61,30	418,7	417,5	418,7	415,2	411,7	411,7	360,5	360,5	360,5	360,5	360,5	360,5	360,5
чистое (99,9%)	10520	0,252	59,60	418,7	410,5	407,3	392,0	373,3	373,3	360,5	360,5	360,5	360,5	360,5	360,5	360,5
Вольфрам	19300	0,126	22,6	114,2	112,5	112,5	108,9	105,6	105,6	100,4	100,4	93,4	93,4	93,4	93,4	93,4
Цинк (чистый)	7140	0,386	14,8	74,4	65,9	64,1	58,8	57,1	57,1	—	—	—	—	—	—	—
Олово (чистое)	7300	0,226	14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Титан	4540,6	0,532	2,27	—	15,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Плотность, теплоемкость и температуропроводность приведены при 20°С.

Таблица III-3

Коэффициент теплопроводности металлов λ , Вт/(м·°С), в зависимости от температуры

t , °С	λ	t , °С	λ	t , °С	λ	t , °С	λ	t , °С	λ	t , °С	λ	t , °С	λ	t , °С	λ	t , °С	λ
Алюминий (99,8%)																	
0	157,0	1200	98,9	Золото (99,999%)		Кадмий (чистый)		Литий		Магний (99,8%)		Молибден (99,84%)		Натрий			
50	172,4	1500	108,2	-100	319,8	-190	104,6	-150	83,7	0	158,2	200	377,9	-10	116,3	-50	98,9
100	187,7	2000	132,6	0	312,8	-100	96,5	100	77,9	0	152,4	300	370,9	0	109,3	0	93,0
200	217,9	2400	147,7	50	311,7	0	93,4	-50	72,1	100	147,7	400	365,2	100	109,3	100	82,6
250	233,1			100	310,5	0	92,6	0	68,0	200	144,2	600	353,6	200	109,3	200	73,3
Висмут (99,995%)																	
-100	11,9	100	87,2	200	308,2	0	90,9	50	67,5	300	143,0	800	340,8	70		400	59,3
-50	10,6	200	76,8	300	307,0	100	90,9	100	70,9	400	143,0	900	332,6			500	58,2
0	9,4	300	66,3	400	309,4	200	90,1	150	73,3	500		1000	319,8				
50	8,4	400	55,8	Золото (99,98%)		Калий (чистый)		Магний (чистый)		Марганец (99,6%)		Молибден (99,84%)		Никель (99,94%)			
100	7,7	500	50,0	0	294,2	0	90,1	0	172,1	0	157,0	Моллибден (99,84%)	110,5	-180	110,5	-50	98,9
200	7,1			0	294,2	0	90,1	100	166,3	100	145,4	0	93,0	0	93,0	0	93,0
Вольфрам																	
0	162,8	0	74,4	Иридий		Кобальт (97%)		Магний (99,6%)		Медь (99,9%)		Молибден (99,84%)		Натрий			
100	151,2	100	68,4	0	59,3	0	69,8	0	145,4	0	157,0	800	113,9	-50	69,8	-50	69,8
200	140,7	200	61,6	100	56,9	100	94,5	100	139,6	100	145,4	1000	104,7	0	67,5	0	67,5
400	465,2	400	48,9	200	55,8	200	91,9	200	134,9	200	133,7	1200	93,0	100	61,6	100	61,6
600	113,9	600	38,4	300	55,2	300	91,9	300	130,3	300	133,7	1400	80,2	200	58,2	200	58,2
800	105,8	800	30,8	300	55,2	300	118,6	400	129,1	400	137,2	1600	68,6	200		200	
1000	98,9							500	130,3	500	139,6						

Продолжение табл. III-3

$t, ^\circ\text{C}$	λ	$t, ^\circ\text{C}$	λ	$t, ^\circ\text{C}$	λ	$t, ^\circ\text{C}$	λ	$t, ^\circ\text{C}$	λ	$t, ^\circ\text{C}$	λ
400	52,3	Палладий		100	80,2	Серебро (99,9%)		500	20,4	Цинк (99,993%)	
600	56,9	-190	76,8	150	75,0	0	419,8	600	21,5	-200	117,5
800	65,1	0	68,6	Свинец (99,99%)		0	410,5	700	22,9	-100	115,1
		100	73,3	250	48,8	100	391,9			0	112,8
		Платина (99,99%)		200	40,7	200	372,2	Цирконий (97%)		100	108,7
-50	63,9	-100	67,8	300	36,7	300	361,7	100	11,9	200	104,7
0	61,6	0	69,8	400	36,6	400	361,7	200	13,3	300	100,0
100	56,9	100	71,8	500	35,1	500	366,3	300	14,5	400	95,4
200	54,7	200	73,7	600	34,5	600	374,5	400	15,6	Уран	
400	48,8	400	77,7	0	25,1	0		500	16,7	0	19,2
600	52,3	600	81,6	50	34,3	Сурьма (99,99%)		600	18,0	100	20,4
800	58,2	800	85,6	100	33,5	200	22,7	Таллий (99,9%)		200	23,3
		0	89,6	150	32,8	300	30,2	450	62,8	300	24,2
		1000	89,6	200	31,9	327	30,0	0	51,2	450	25,8
		1100	101,2	Серебро (99,98%)		0	18,8	Цирконий (100%)			
-150	79,1	-200	425,7	100	16,7	100	16,7	100	20,1	100	20,1
0	66,1	-100	422,2	200	15,9	200	15,9	200	20,4	200	20,4
50	63,2	0	418,7	300	16,6	300	16,6	300	19,9	300	19,9
100	60,8	100	416,4	400	18,0	400	18,0	400	19,9	400	19,9
150	59,2	-50	93,0	500	20,2	500	20,2				
200	57,9	0	89,1	600	23,3	600	23,3				
230	57,3	50	84,9		415,2						

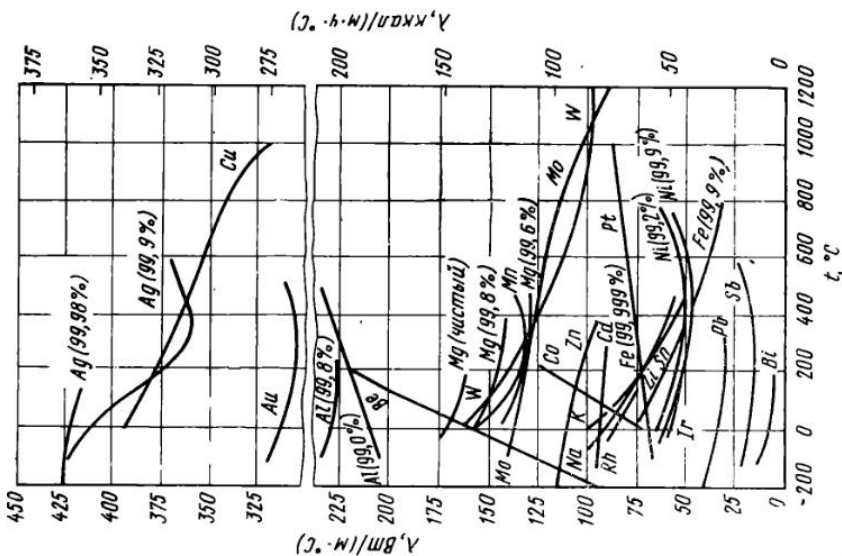


Рис. 12. Зависимость коэффициента теплопроводности металлов от температуры t

Таблица III-4

Коэффициент теплопроводности λ некоторых цветных металлов и технических сплавов

Наименование сплава	Химический состав, %	λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С						
		0	100	200	300	400	500	600
Никель чистой 99,2%	—	67,5	62,8	58,2	—	52,3	—	56,9
Нихром	10 Cr, остальное никель 20 Cr, остальное никель 15 Cr+20 Fe+4 Mn, остальное никель 16 Cr+23 F, остальное никель	17,1 12,2	18,9 13,8	20,9 15,6	22,8 17,2	24,7 18,9	—	— 22,6
Монель	40 Cu, остальное никель 29 Cu+Fe, остальное никель 12 Cr+25 Fe, остальное никель	11,6 11,8	11,9 13,3	12,2 14,6	12,4 16,5	12,7 17,4	12,9	13,1 —
		20,1	25,6	32,8	39,7	—	—	—
		20,1	24,4	27,6	30,2	33,7	—	—
		13,5	14,9	15,2	15,5	15,7	15,8	16,2
<i>Сплавы никеля по ГОСТ 492—58</i>								
Мельхиор: НМ81	19 Ni+1Co, остальное медь	37,7	—	—	—	—	—	—
НМ70	30 Ni+1Co, остальное медь	37,1	—	—	—	—	—	—
Константан НММц 58,5—1,54	40,0 Ni + 1,5 Mn, остальное медь	20,9	23,2	26,3	30,6	37,2	—	—
Копель НМ 56,5	43,0 Ni, остальное медь	24,2	—	—	—	—	—	—
Монель НМЖМц и К-монель	25,0 Fe+57,0 Ni+1,6 Mn, остальное медь	25,1	—	—	—	—	—	—
Алюмель	2,0 Al+94,0 Ni+2,0 Mn	32,7	—	—	—	—	—	—
Хромель	90,0 Ni+9 Cr+1 Co	16,0	17,8	19,8	21,6	23,5	—	—
Манганин НММц 85—12	Cu+3,0 Ni+12,0 Mn	21,7	26,4	31,4	36,1	—	—	—

Продолжение табл. III-4

Тип новации сплава	Химический состав, %	λ, Вт/(м·°С), при температуре, °С						
		0	100	200	300	400	500	600
Инвар	65,0 Fe+35,0 Ni	11,0	11,4	11,9	12,7	—	—	—
<i>Магниеые сплавы</i> по ГОСТ 2856—68								
	92 Mg+8,0 Al	61,6	70,0	79,3	88,9	—	—	—
	88 Mg+10,0 Al+2,0 Si	58,2	66,4	75,9	—	—	—	—
	92 Mg+8,0 Cu	125,9	130,0	133,3	139,2	—	—	—
Электрон	93 Mg+0,5 Cu+4,0 Zn	117,5	130,9	—	—	—	—	—
Платиноидий	90 Pt+10,1 Ir	30,9	31,4	32,4	—	—	—	—
Платинородий	90 Pt+10Rh	30,2	30,6	31,6	—	—	—	—
<i>Мягие припой</i> по ГОСТ 1499—70:								
олово чистое	—	66,1	59,3	56,9	—	—	—	—
свинец чистый	—	35,1	33,4	32,2	29,8	—	—	—
ПОС-90	89—90 Sn, не более 0,15 Sb, остальное свинец	62,6	—	—	—	—	—	—
ПОС-40	40,0 Sn+2 Sb, остальное свинец	39,8	—	—	—	—	—	—
ПОС-30	30,0 Sn+2 Sb, остальное свинец	38,1	—	—	—	—	—	—
ПОС-18	18,0 Sn+2,5 Sb, остальное свинец	38,5	—	—	—	—	—	—
Металл Розе	50 Bi+25 Sn+25 Pb	16,3	—	—	—	—	—	—
Металл Вуда	48 Bi+13 Cd+13 Sn+26 Pb	12,8	—	—	—	—	—	—

Таблица III-5

Коэффициент теплопроводности λ и температура плавления $t_{пл}$ технических сплавов меди

Наименование сплава	Химический состав, %	$t_{пл}$, °C	λ , Вт/(м·°C), при температуре, °C						
			0	100	200	300	400	500	600
Медь чистой 99,8%		1080	386,1	379,1	373,3	—	364,0	—	353,6
Латуни (ГОСТ 1019—47):									
Л1-96	95,0—97,0 Cu+0,2 примеси, остальное цинк	1070	244,2	—	246,6	—	254,7	—	—
Л1-90	88,0—91,0 Cu+0,2 примеси, остальное цинк	1045	113,9	125,6	141,9	157,0	174,5	188,4	203,5
Л1-80	79,0—81,0 Cu+0,2 примесей, остальное цинк	1003	111,6	115,1	117,5	122,1	127,9	134,9	144,2
Л1-68	67,0—70,0 Cu+0,3 примесей, остальное цинк	938	105,8	109,3	110,5	113,9	116,3	119,8	120,9
Л1-62	60,5—63,5 Cu+0,5 примесей, остальное цинк	905	105,8	119,8	137,2	152,4	168,6	186,1	200,0
Л1-59—3—2	57,0—60,0 Cu + 2,5—3,5 Al + 2,0—3,0 Ni+0,9 примеси, остальное цинк	956	83,7	96,5	109,3	122,1	134,9	143,0	152,4
ЛМц 58—2	57,0—60,0 Cu+1,0—2,0 Mn+1,2 примеси, остальное цинк	880	70,2	81,4	90,7	100,0	108,7	117,5	122,1
ЛС-59—1	57,0—60,0 Cu+0,8—1,3 Pb+0,75 примеси, остальное цинк	900	104,7	116,3	127,9	140,7	155,8	169,8	182,6
ЛС-59—1В	57,0—60,0 Cu+0,8—1,9 Pb+1,5 примеси, остальное цинк	900	103,5	114,6	125,6	136,1	147,7	157,0	—
ЛО-62—1	61,0—63,0 Cu+0,7—1,1 Sn+0,3 примеси, остальное цинк	906	98,9	—	—	—	—	—	—
ЛО-70—1	69,0—71,0 Cu+1,0—1,5 Sn+0,3 примеси, остальное цинк	980	91,9	—	—	134,9	—	—	—
ЛТО-90—1	88,0—91,0 Cu+0,25—0,75 Sn+0,2 примеси, остальное цинк	1015	124,4	140,8	157,0	174,0	194,2	209,3	222,1
Нейзильбер МНЦ	18—22,0 Zn+13,5—16,5 Ni+0,9 примеси, остальное медь	—	23,4	31,4	39,5	45,4	48,8	—	—
Бронзы (ГОСТ 613 — 65, 1761—70, ЦМТУ 270 — 41, 572—41, 669—41):									
Бр О-10	9—11 Sn, остальное медь	1020	48,1	52,3	55,9	—	—	—	—
Бр ОЦ10—2	3,0 Zn+10,0 Sn, остальное медь	980	55,4	56,4	63,4	68,0	72,1	74,7	76,8
Бр ОЦ18—4	5,0 Zn+8,0 Sn, остальное медь	995	68,3	76,8	82,6	88,4	93,0	95,7	99,8
Бр ОЦ6—6—3	6,0 Zn+6,0 Sn+3,0 Pb, остальное медь	967	63,7	70,9	76,9	81,6	86,6	90,7	93,0

Продолжение табл. III-5

Наименование сплава	Химический состав, %	t _{пл.} , °C	λ, Вт/(м·°C), при температуре, °C					
			0	100	200	300	400	500
Бр ОЦ4-3	3,0 Zn+4,0 Sn, остальное медь	—	83,7	93,0	101,4	108,2	113,9	124,4
Бр Ф10-1	10,0 Sn+1,0 Pb, остальное медь	934	34,3	37,8	43,4	45,9	48,8	50,6
Бр ОС5-25	5,0 Sn+25,0 Pb, остальное медь	940	58,2	63,9	70,9	76,5	80,2	83,2
Бр ОС10-10	10,0 Sn+10,0 Pb, остальное медь	1024	45,1	51,4	—	60,6	—	67,5
Бронзы (ГОСТ 493-54):								
Бр-А5	5,0 Al+1,6 примеси, остальное медь	1075	104,7	114,3	123,9	133,2	140,7	147,7
Бр А7, С	7,0 Al+1,6 примеси, остальное медь	1050	96,5	104,7	114,2	122,1	129,1	135,1
Бр А Мц9-2	9,0 Al+2,0 Mn+1,7÷2,8 примеси, остальное медь	1060	71,2	82,6	93,4	101,2	—	—
Бр АЖМц10-3-1-5	10,0 Al+3,0 Fe+1,5 Mn+0,75 примеси, остальное медь	1045	58,6	64,2	71,3	76,8	80,7	83,7
Бр АЖН10-4-4	4,0 Ni+10,0 Al+4,0 Fe+1,0 примеси, остальное медь	1084	75,2	86,6	97,5	—	—	—
Бр АЖН11-6-6	6,0 Ni+14,0 Al+6,0 Fe+1,5 примеси, остальное медь	1135	63,7	71,3	77,3	82,1	87,2	94,2
Бр КМц3-1	1,0 Mn+3,0 Si+1,0 примесей, остальное медь	1025	41,9	50,0	54,7	—	54,1	—
Бр Мц5	5,0 Mn+0,9 примеси, остальное медь	1047	94,2	102,8	111,9	121,8	126,8	—
Бр МцС 8-20	20,0 Pb+0,8 Mn+0,5 примесей, остальное медь	885	32,1	37,3	43,0	45,9	48,8	51,4
Разные бронзы	25,0 Sn, остальное медь	—	25,6	31,9	36,6	41,9	—	—
	2,0 Zn+10,0 Sn, остальное медь	—	55,8	62,8	70,4	—	—	—
	2,0 Zn+5,0 Sn+0,15 P, остальное медь	—	80,2	92,5	—	114,6	123,3	—
	8,0 Sn+0,3 P, остальное медь	—	45,4	—	—	—	—	—
	12,4 Sn+0,4 P, остальное медь	—	37,2	48,1	54,1	—	—	—
	40,0 Ni, остальное медь	—	23,3	25,6	34,3	39,9	—	—
	4,0 Ni+12,0 Mn, остальное медь	—	21,9	26,4	31,4	36,1	—	—
	30,0 Ni, остальное медь	—	13,4	16,5	21,1	—	—	—
	10,0 Ni, остальное медь	—	59,3	66,3	74,9	81,1	88,2	102,1
	20,0 Ni, остальное медь	—	33,7	40,7	48,1	53,8	—	—
	60,0 Ni, остальное медь	—	22,1	25,6	33,1	39,7	—	—
	10 Sn, остальное медь	—	41,9	—	—	—	—	—
	30,0 Mn, остальное медь	—	12,8	—	—	—	—	—

Таблица III-6

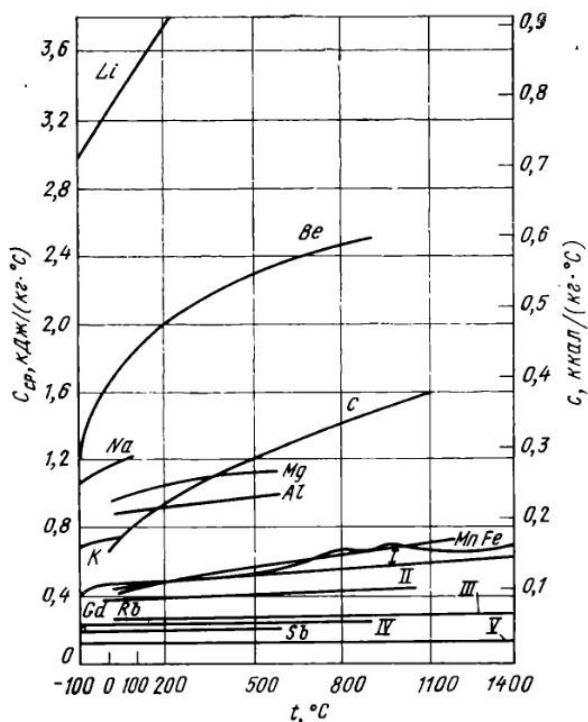
Средняя теплоемкость металлов c_{cp} , кДж/(кг·°С) в зависимости от температуры

t , °С	c_{cp}	t , °С	c_{cp}	t , °С	c_{cp}	t , °С	c_{cp}	t , °С	c_{cp}	t , °С	c_{cp}	t , °С	c_{cp}	t , °С	c_{cp}	t , °С	c_{cp}						
Алюминий																							
0	0,895	400	0,528	Иридий				400	0,477	400	0,540	Платина				0	0,1310	Свинец		0	0,532		
50	0,904	600	0,536	0	0,1285	600	0,502	600	0,502	600	0,595	200	0,1344	1000	0,1428	100	0,1231	100	0,1231	100	0,540		
100	0,909	800	0,549	200	0,1315	800	0,532	800	0,532	800	0,624	400	0,1373	1200	0,1482	200	0,1273	200	0,1273	200	0,553		
1200	0,586	0	0,352	400	0,1348	1000	0,574	1000	0,574	1200	0,724	1200	0,619	0	0,389	600	0,1403	600	0,1403	400	0,574		
1400	0,641	29	0,356	600	0,1377	1200	0,619	1200	0,619	Нагрый		100	0,394	800	0,1428	200	0,1336	200	0,1336	600	0,595		
Висмут																							
0	0,1235	0	0,439	Литий				200	2,63	150	1,022	1000	0,1440	200	0,398	1000	0,1453	300	0,1369	800	0,619		
50	0,1248	100	0,461	0	3,06	0	3,06	0	3,06	20	1,206	1200	0,1469	400	0,406	1200	0,1482	1600	0,1532	900	0,628		
100	0,1260	200	0,482	50	3,42	50	3,42	50	3,42	70	1,261	1400	0,1499	600	0,414	1400	0,1507	Серебро			Хром		
150	0,1273	600	0,578	100	3,56	150	3,68	90	1,244	90	1,244	1600	0,1532	800	0,423	1600	0,1532				Хром		
200	0,1285	800	0,645	180	3,77	180	3,77	Магний				0	0,251	1000	0,431	1000	0,431				Хром		
250	0,1298	900	0,666	0	0,230	0	0,230	Никель				0	0,2437	200	0,259	200	0,259	200	0,259	200	0,276		
0	1,298	1000	0,682	50	0,231	50	0,231	Никель				0	0,427	400	0,265	400	0,265	400	0,265	400	0,461		
100	1,888	1200	0,678	100	0,2336	100	0,2336	Никель				0	0,448	600	0,268	600	0,268	600	0,268	600	0,473		
200	2,026	1400	0,678	150	0,2353	150	0,2353	Никель				0	0,448	800	0,271	800	0,271	800	0,271	800	0,494		
300	2,148	1500	0,695	200	0,2369	200	0,2369	Никель				0	0,448	1000	0,276	1000	0,276	1000	0,276	1000	0,544		
400	2,219	0	0,1339	250	0,2386	250	0,2386	Никель				0	0,448	1200	0,281	1200	0,281	1200	0,281	1200	0,565		
500	2,294	0	0,1339	Калий				100	0,976	100	0,976	1000	0,523	1400	0,285	1400	0,285	1400	0,285	1400	0,590		
600	2,357	200	0,1361	100	0,669	100	0,669	Никель				0	0,427	1200	0,285	1200	0,285	1200	0,285	1200	0,590		
700	2,416	400	0,1382	50	0,729	50	0,729	Никель				0	0,427	1400	0,293	1400	0,293	1400	0,293	1400	0,615		
800	2,470	600	0,1403	20	0,733	20	0,733	Никель				0	0,427	Олово		0	0,222	0	0,222	0	0,343		
900	2,525	800	0,1424	0	0,737	0	0,737	Никель				0	0,427	0	0,226	10	0,339	10	0,339	10	0,368		
Ванадий																							
0	0,494	100	0,1302	0	0,745	0	0,745	Никель				0	0,427	50	0,226	20	0,343	20	0,343	20	0,3839		
100	0,502	200	0,1306	200	0,741	200	0,741	Никель				0	0,427	100	0,230	300	0,2148	300	0,2148	300	0,3923		
200	0,502	400	0,1327	50	0,745	50	0,745	Никель				0	0,427	150	0,234	400	0,2181	400	0,2181	400	0,4011		
300	0,502	600	0,1348	0	0,431	0	0,431	Никель				0	0,427	200	0,239	500	0,2211	500	0,2211	500	0,4095		
400	0,502	800	0,1378	100	0,461	100	0,461	Никель				0	0,427	230	0,243	600	0,2239	600	0,2239	600	0,4183		
500	0,502	1000	0,1403	200	0,486	200	0,486	Никель				0	0,427									0	0,4183

Таблица III-7

Энтальпия различных металлов, кДж/кг

Температура, °C	Al	Co	Cu	Ni	Sn	Pb	Zn	Cr
100	93,789	45,598	39,979	45,176	24,196	10,848	30,607	49,333
200	189,662	92,687	79,549	93,851	53,507	23,454	80,470	99,763
300	273,189	141,204	122,464	142,485	136,959	37,945	123,218	150,788
400	383,176	191,672	166,132	204,400	158,060	75,647	167,807	202,825
500	485,878	248,131	211,433	251,773	179,216	88,048	318,615	255,722
600	587,148	304,841	260,251	305,394	200,891	102,593	370,029	313,081
700	1017,824	366,726	309,195	356,967	—	116,728	423,202	371,591
800	1073,462	434,757	358,055	408,766	—	130,226	476,625	432,379
900	1216,123	503,609	398,165	462,574	—	—	—	497,090
1000	1312,352	576,792	462,641	520,545	—	—	—	564,255
1100	—	654,116	727,666	576,192	—	—	—	636,339
1200	—	743,626	779,749	635,355	—	—	—	713,632
1300	—	831,170	830,577	696,030	—	—	—	792,478

Рис. 13. Зависимость средней теплоемкости c металлов от температуры t :

Кривая на рис. 13	Металл	Температура t , °C
I	V Co Ni Cr	0—1400 100—1200 0—900 100—1500
II	Cu Zn	0—1000 100—400
III	Mo Nb Rh	0—1400 0—1400 0—1400
IV	Cd Sn Ag	10—250 0—230 100—900
V	Bi Au Ir W Pt Pb	0—250 0—1000 0—1500 0—1500 0—1500 100—300

Таблица III-8

Коэффициент температуропроводности металлов $\alpha \cdot 10^3, \text{ м}^2/\text{ч}$, в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	α	$t, ^\circ\text{C}$	α	$t, ^\circ\text{C}$	α	$t, ^\circ\text{C}$	α	$t, ^\circ\text{C}$	α	$t, ^\circ\text{C}$	α	$t, ^\circ\text{C}$	α	$t, ^\circ\text{C}$	α		
Железо (99,9%)																	
1	77,3	200	158,6	600	151	1000	137	1500	160	1000	125	1500	160	1000	125		
100	64,2	300	154,7	800	125	1200	104	1400	86	1400	86	1600	72	1600	72		
200	55,1	Калий															
400	37,1	1	560	Натрий												500	92,2
200	304	10	550	100	177	200	156	300	136	400	113	500	94,5	600	507		
300	302	20	540	300	130	400	127	500	123	600	110	700	95,2	800	96,3		
400	298	30	530	1000	100	340	338	1000	97,3	1100	98,0	1200	98,0	1300	98,0		
500	296	40	522	200	334	300	335	400	334	500	330	600	330	700	330		
Золото (99,999%)																	
-100	474,0	0	447	100	438,5	200	432,8	300	431,1	400	431,8	500	431,8	600	431,8		
Бериллий (99,5%)																	
0	183,4	100	179,9	200	189,9	300	189,9	400	189,9	500	189,9	600	189,9	700	189,9		
Висмут																	
0	28,4	50	24,4	100	22,0	150	20,0	200	18,0	250	16,0	300	14,0	350	12,0		
Иридий																	
0	74,8	100	69,50	200	66,48	300	64,54	400	63,6	500	63,6	600	63,6	700	63,6		
Литий																	
0	145	50	138	100	123	150	110	200	100	250	90	300	80	350	70		
Кадмий																	
0	226	200	189,9	400	168,2	600	146,1	800	132,3	1000	120,6	1200	114,7	1400	102,0		
Родий																	
0	105	50	99	100	92	150	81	200	73,6	250	66,4	300	60,0	350	52,8		
Свинец (99,99%)																	
-250	145	-200	112,5	-100	92,1	0	87,4	100	80,5	200	68,6	300	60,0	400	52,8		
Сурьма (99,99%)																	
-100	63,3	0	49,2	100	42,7	200	39,6	300	36,6	400	34,6	500	32,6	600	30,6		
Серебро (99,9%)																	
-100	666	0	610	100	570	200	544	300	512	400	486	500	466	600	446		
Цинк (99,993%)																	
-200	167	-100	157	0	148	100	138	200	128	300	119	400	110	500	101		

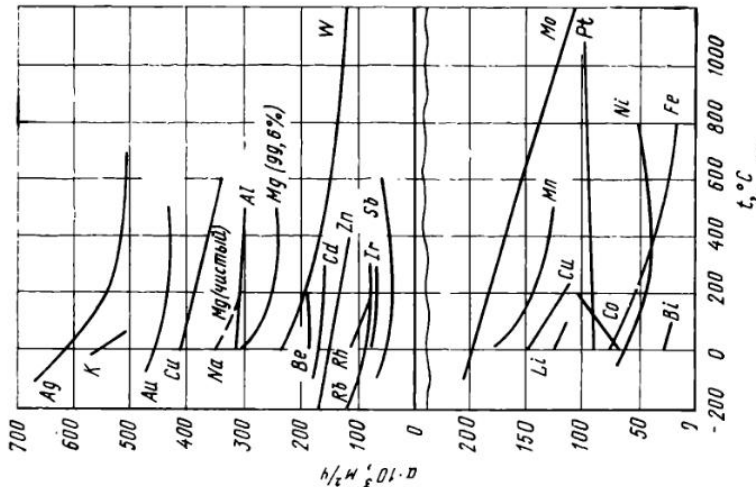


Рис. 14. Зависимость коэффициента температуропроводности α металлов от температуры t

Таблица III-9

Средний коэффициент линейного расширения металлов $\beta \cdot 10^6$, $1/^\circ\text{C}$, в интервале температур от 0 до t , $^\circ\text{C}$

t , $^\circ\text{C}$	β	t , $^\circ\text{C}$	β	t , $^\circ\text{C}$	β	t , $^\circ\text{C}$	β	t , $^\circ\text{C}$	β	t , $^\circ\text{C}$	β	t , $^\circ\text{C}$	β	
Алюминий	1700 5,51 1900 5,60 2100 5,8	Кадмий		Медь		Ниобий		1000 11,21 1200 11,62 1400 11,94 1500 12,07		200 9,6 300 9,8 400 10,0 500 10,2 600 10,3				
-100 19,5 0 22,8 100 23,7 200 24,5 300 25,4 400 26,2 500 27,1 600 27,9	Галлий 0 18,1	Железо 0 11,3 100 12,15 200 12,7 400 13,8 600 14,5 800 14,8		0 28,3 0 29,0 50 29,7 100 30,4 150 31,1 200 31,8 250 32,4		0 16,7 100 17,06 200 17,42 400 18,14 600 18,86 800 19,58 1000 20,3		0 7,06 100 7,20 200 7,35 400 7,64		Олово 0 21,0 50 23,5 100 26,2 150 28,9 200 31,6		-250 25,1 -200 26,5 -100 27,3 0 28,3 100 29,2 200 30,3 300 31,3	0 7,7 100 8,1 200 8,5 400 9,2 600 10,0 700 10,4	
Бериллий 0 10,5 100 11,7 200 12,8 300 13,7 400 14,5 500 15,2 600 15,7	Золото 0 14,15 100 14,32 200 14,51 400 14,96 600 15,49 800 16,12 1000 16,80	Магний -100 24,12 0 25,07 100 26,00 200 27,0 400 29,83 600 31,71	Кобальт 0 12,0 100 12,5 200 13,0 300 13,5 400 13,9 500 14,4	Молибден 0 5,1 100 5,19 200 5,28 300 5,39 400 5,48 500 5,59 600 5,68 800 5,87		Платина 0 8,95 100 9,1 200 9,2 400 9,45 600 9,65 800 9,9 1000 10,15 1100 10,35		Серебро -100 18,5 0 19,5 100 19,62 200 19,79 300 20,0 400 20,3 500 20,6 600 21,0 700 21,4 800 21,8 900 22,4		Хром -100 5,1 0 5,88 100 6,61 200 7,28 400 8,40 600 9,22 700 9,40		Цинк -200 22 -100 28 0 30 100 32 200 34 300 36 400 38		
Висмут 0 15,4	Иридий 0 6,5 100 6,65 200 6,80 400 7,11 600 7,41 800 7,72	Марганец 0 22 200 22,2 400 23,0 600 24,0 800 26,0		0 13,40 100 13,60 200 14,00 250 14,27 300 14,60 350 14,97 400 14,98 600 15,56 800 16,13		Родий 0 7,85 200 8,71 400 9,46 600 10,14 800 10,71		Сурьма 0 9,2 100 9,4						
Вольфрам 0 4,3 200 4,44 400 4,6 600 4,72 800 4,86 1000 5,01 1200 5,15 1500 5,35														

Таблица III-10

Удельное электросопротивление металлов $\rho_3 \cdot 10^6$, Ом·см

t , $^\circ\text{C}$	ρ_3	t , $^\circ\text{C}$	ρ_3	t , $^\circ\text{C}$	ρ_3	t , $^\circ\text{C}$	ρ_3	t , $^\circ\text{C}$	ρ_3	t , $^\circ\text{C}$	ρ_3
Алюминий (99,7%)	0 5,7 100 9,5 200 13,6 400 22,5 600 33,5 700 39,0	Висмут (99,9%)		1400 46,0 1600 52,5 2000 66,0 2400 80,0 2800 95,2 3200 110		200 21,5 400 42 600 69 800 101 1000 117 1200 122 1400 126		600 7,7 800 10,0 1000 12,5		Иридий 0 4,85 100 6,85 200 8,77 400 13,2 600 17,2	
-100 1,46 0 2,62 100 3,86 200 5,2 300 6,5 400 8,1 500 9,6 600 10,9	Ванадий (99%)	0 19 50 21,8 100 25 200 30 300 36	Вольфрам	0 5,00 200 10,0 400 15,0 800 26,5 1000 33,0		Галлий 0 43,9— -53,4		Золото (99,99%) 0 2,19 100 3,0 200 3,8 400 5,5		Кадмий (99,9%) -50 5,14 0 6,5	
Бериллий (99,5%)	0 1,3 -100 2,8					Железо (99,92%) 0 9,0 100 15,0					

$t, ^\circ\text{C}$	ρ_3	$t, ^\circ\text{C}$	ρ_3	$t, ^\circ\text{C}$	ρ_3	$t, ^\circ\text{C}$	ρ_3	$t, ^\circ\text{C}$	ρ_3	$t, ^\circ\text{C}$	ρ_3
50	7,86	200	2,38	Платина (99,999%)		Сурьма		800	145	1600	124,1
100	9,29	400	4,26	0	11,75	200	8	950	148	1800	146,0
200	12,1	600	5,72	100	13,64	100	22	Хром (электролитический)		Цинк (99,993%)	
250	13,5	800	7,38	200	17,35	0	36				
		1000	9,24	300	21,0	100	51	0	14,5	-250	0,05
Калий		Молибден		400	24,4	200	21,9	200	21,9	-200	1,30
-10	5,78	0	5,15	500	27,8	0	56	400	31,1	-100	3,31
0	6,1	200	11	Родий		Титан		600	42,1	0	5,50
10	6,4	400	16,5	0	4,3	0	80	800	54,9	100	7,9
30	7,1	800	28	200	8,08	100	106	1000	72,5	200	10,4
50	7,7	1000	33	400	11,87	200	133	1200	85,9	300	13,2
Кобальт (99,95%)		2200	68	600	15,65	400	138	1400	104,1	400	16,0
0	5,5	2400	74	800	19,44	600	138				
100	10,1	2500	78	1000	23,22	200	106				
200	14,7	Натрий		Рубидий (чистый)		400	133				
300	19,5	-200	0,75	0	11,4	600	138				
400	25,5	-100	2,30	10	12,0						
Литий		0	4,26	20	12,6						
-200	0,86	50	5,28	30	13,2						
-100	4,74	75	5,85	Свинец							
0	8,65	Никель (99,98%)		-250	0,5						
50	10,6	0	6,5	-200	4,0						
100	12,3	100	10,8	-100	11,5						
150	14,0	200	16,2	0	19,0						
Магний		400	31,7	100	27,2						
0	4,2	600	39,2	200	36,5						
100	5,77	800	44,2	300	48,0						
200	7,57	1000	49,1	320	54,0						
400	12,05	Ниобий		Серебро (99,9%)							
600	17,3	0	14	-250	0,0135						
Марганец		100	17,5	-200	0,300						
0	255	200	21	-100	0,893						
200	280	Олово (99,99%)		0	1,50						
400	300	0	11	100	2,12						
600	310	50	13,8	200	2,73						
800	310	100	16,5	400	4,05						
1000	130	150	19,2	600	5,44						
1200	70	200	22	800	6,88						
Медь (99,999%)		900	7,65	900	7,65						
0	1,55										
100	2,22										

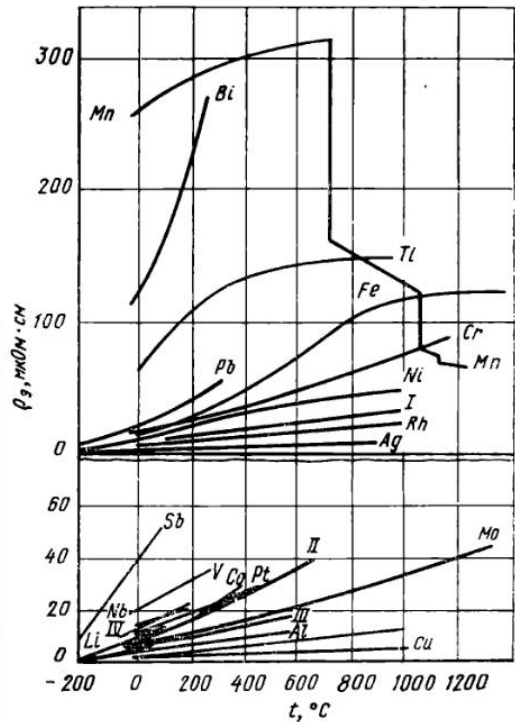


Рис. 15. Зависимость удельного электросопротивления ρ_3 (мкОм·см) металлов от температуры t :
 I — W от 0 до 3400°C, Zn от -250 до 400°C; II — Be от -200 до 700°C, Cd от -50 до 250°C, K от -10 до 50°C; III — Ir от 0 до 600°C, Mg от 0 до 600°C; IV — Rb от 0 до 30°C, Sn от 0 до 200°C

Таблица III-11

Удельное электросопротивление ρ_{Σ} некоторых сплавов при различных температурах

Сталь легированная конструкционная:	$\rho_{\Sigma} \cdot 10^6$, Ом·см
Инвар (64% Fe, 36% Ni и др.)	75 (0)
Константан (60% Cu, 40% Ni)	49,0 (18); 49,1 (100)
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	4,1 (—160); 6,6 (17)
Манганин (84% Cu, 4% Ni, 12% Mn)	43,13 (—160); 44,50 (18); 42,11 (100)
Нихром	110 (20)
Нейзильбер:	
62% Cu, 15% Ni, 22% Zn	26,6 (0); 27,6 (100)
60% Cu, 14% Ni, 24% Zn, 2% W	32,5 (—160); 34,4 (18)
Платиноид составов:	
90% Pt; 10% Rh	21,1(0)
67% Pt; 33% Ag	24,2 (0)

Примечание. В скобках дана температура, °С, при которой приведено удельное электросопротивление.

Таблица III-12

Механические свойства важнейших металлов

Название металла и обозначение модификации	σ_B , МН/м ²	$\sigma_{\text{пц}}$, МН/м ²	σ_T , МН/м ²	δ , %	ψ , %	E , МН/м ²	HB
Алюминий (Al)	80—110	30	30—70	40	85	72000	20—35
Бериллий (α -Be)	140	60	—	—	—	300000	140
Вольфрам (β -W)	1200—1400	—	750	—	—	420000	350
Железо (α -Fe)	250—330	120	125	25—55	70—85	210000	50
Кадмий (α -Cd)	62	3	10	20	50	530000	20
Кобальт (α -Co)	240	—	—	5	—	207500	125
Кремний (Si)	—	—	—	—	—	114500	240
Магний (Mg)	170—200	12	20—60	15	20	43600	25
Марганец:							
α -Mn	}	Хрупкий				201600	210
β -Mn							
Медь (Cu)	220	15	60—80	60	75	132000	35
Молибден (Mo)	700	—	—	30	—	330000	125
Никель (α -Ni)	400—500	80	120	40	70	205000	60—80
Нюбий (Nb)	340	—	—	—	30	—	250
Олово (белое) (β -Sn)	20—40	1,5	—	40	75	55000	5
Свинец (Pb)	18	2,5	5—10	50	100	17000	4—6
Титан (α -Ti)	600	—	440	28	—	105000	230
Хром (α -Cr)	Хрупкий					252000	220
Цирконий (α -Zr)	950 (провода)	—	—	—	—	70000	82
Цинк (Zn)	110—150	—	90—100	5—20	—	94000	30—42

Т а б л и ц а III-13

Основные характеристики материалов для нагревательных элементов

Наименование материала или марка, химический состав	Область применения	Плотность, ρ , г/см ³	Удельное электрическое сопротивление ρ_2 при t , °С, Ом·мм ² /м	Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ средний в интервале 20 ÷ t °С, 1/°С
Сталь	Нагреватели низкотемпературных печей, термоэлектроды	7,86	$0,12 \div 0,15 + 7 \div 10 \cdot 10^{-3} t$	11,7
Сталь Х25Н20С2 (ЭИ283), 23—27% Сг; 17—20% Ni; 2—3% Si; 50—53% Fe	Жароупорные детали, нагревательные элементы печей, до 800°С	7,84	$0,92 + 38 \cdot 10^{-5} t$	16,3
Сталь Х23Н48 (ЭИ417), 22—25% Сг; 17—20% Ni; 53—57% Fe	Жароупорные детали, нагревательные элементы печей, до 800°С	7,8	$0,9 + 40 \cdot 10^{-5} t$	17,0
Сталь ЭИ595 (сплав модифицирован), 21,5—23,5% Сг; 4,3—4,8% Al; <0,5% С	Нагревательные элементы печей, до 1150°С	7,27	$1,4 + 5 \cdot 10^{-5} t$	17,4
Сталь ЭИ595 (сплав модифицирован),	Нагревательные элементы печей, до 1250°С	7,19	$1,4 + 5 \cdot 10^{-5} t$	—
Богатый железом нихром 20/35, 15—20% Сг; 30—35% Ni; 45—50 Fe	жароупорные детали, нагревательные элементы печей, до 900°С, и бытовых приборов	7,95	$1,06 + 26 \cdot 10^{-5} t$	16,0
Нихром Х15Н60 (ЭХН60), 15—18% Сг; 55—61% Ni; 22—27% Fe; <0,15% С	Нагревательные элементы печей, до 950°С	8,2 ÷ 8,36	$1,09 \div 1,12 + 14 \cdot 10^{-5} t$	13,0
Нихром Х20Н80 (ЭХН80), 20—23% Сг; 75—78% Ni; 1,5% Fe; <0,15% С	Нагревательные элементы печей, до 1100°С	8,4	$1,07 \div 1,12 + 8,5 \cdot 10^{-5} t$	14,0
Нихром Х20Н80Т, 19—21% Сг; 75—78% Ni; 2—3% Ti; <0,08% С	То же	8,4	$1,07 \div 1,12 (20^\circ\text{C})$	—
Нихром Х20Н80 ТЗ, <2,5% Fe; 0,5% Мп; 19—23% Сг; 69—75 Ni; 2—2,9% Ti; 0,4—1,1% Al	Нагревательные элементы печей, до 1150°С	8,4	$1,27 + 4 \cdot 10^{-5} t$	—
Фехраль Х13Ю4 (ЭИ60), 12—15% Сг; 3,5—5,5% Al; 80—83% Fe; <0,15% С	Нагревательные элементы печей, до 700°С, и бытовых приборов	7,4	$1,26 + 6 \cdot 10^{-5} t$	—
Сплав для бытовых приборов, 12—15% Сг; 2,5—3,0% Al; 0,12% С; ост. Fe	Нагревательные элементы бытовых приборов	7,5	$0,88 + 10^{-4} t$	13 (20—200°С) 14—15 (20—200°С)
Кантал, 20% Сг; 3% Al; Co; ост. Fe	Нагревательные элементы печей, до 1200—1250°С	7,1—7,25	$1,3 \div 1,45 + 6 \div 9 \cdot 10^{-5} t$	15,5 (20—200°С)
Мегапир, 30% Сг; 5% Al; <0,1% С; ост. Fe	То же	7,1	$1,4 + 4 \cdot 10^{-5} t$	16,0 (20—200°С)

Наименование материала или марка, химический состав	Область применения	Плотность, ρ , г/см ³	Удельное электрическое сопротивление ρ_e при t , °С, Ом·мм ² /м	Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ средний в интервале $20 \div t$ °С, $1/^\circ\text{C}$
Платина	Нагревательные элементы лабораторных печей на 1100—1300°С	21,46	$0,98 + 3,86 \cdot 10^{-3} t - 5,68 \cdot 10^{-5} t^2$ погрешность 0,5% $0 < t \leq 660^\circ\text{C}$	$8,95 + 1,22 \times 10^{-3} t$, погрешность 0,5%; $0 < t < 1100^\circ\text{C}$
Молибден	Нагревательные элементы вакуумных, до 1650°С, и водородных, до 2000°С, печей	10,2	$0,515 + 2,85 \cdot 10^{-3} t + 2,06 \times 10^{-5} t^2$, погрешность 3%, $0 < t < 2500^\circ\text{C}$	$5,1 + 9,65 \cdot 10^{-4} t$, погрешность 2%; $0 < t < 2100^\circ\text{C}$
Вольфрам	Нагревательные элементы вакуумных и водородных печей, до 3000°С	19,34	$2,6 \cdot 10^{-3} t + 1,74 \cdot 10^{-5} t^2$, погрешность 3%, $500 < t < 3200^\circ\text{C}$	$4,3 + 7,1 \cdot 10^{-4} t$, погрешность 3%; $0 < t < 2100^\circ\text{C}$
Тантал	Нагревательные элементы вакуумных и водородных печей, до 2500°С	16,6	$0,15 + 4 \cdot 10^{-3} t$	6,5 (0—100°С)
Глобар (SiC)	Нагревательные элементы печей, на 1350—1400°С	2,3*	800—1900	—
Силит (SiC)	То же	2,2*	800—1900	—
Графит	Нагревательные элементы печей, на 2000—3000°С	1,6*	8—13	—
Уголь	То же	1,0—1,25*	40—60	—
Криптол (C)	Нагревательные элементы лабораторных печей, на 1400—1800°С	1,0—1,25*	600—2000	—

* Плотность дана с учетом пористости.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЕЙ

В зависимости от химического состава стали делят на углеродистые и легированные.

Углеродистые стали (рис. 16) по содержанию углерода делят на малоуглеродистые — не более 0,32% С, среднеуглеродистые — от ~0,3 до 0,65% С и высокоуглеродистые — от 0,68 до 1,5% С.

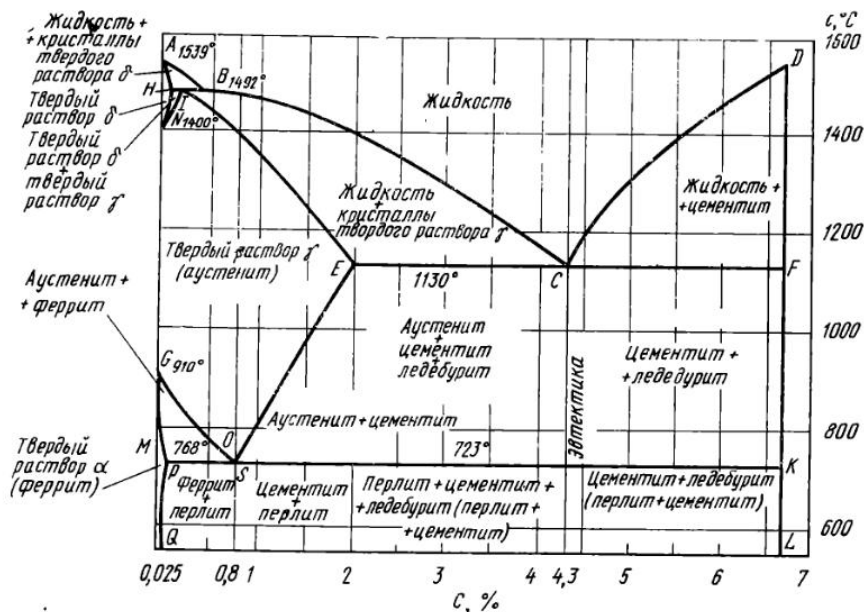


Рис. 16. Диаграмма состояния Fe—C

Легированные стали принято делить на низколегированные (суммарное содержание легирующих элементов не более ~4%); среднелегированные (от ~4—5 до 8—10%) и высоколегированные (от ~10 до 50%).

По назначению углеродистые стали делятся на конструкционные и инструментальные. Конструкционные углеродистые стали в свою очередь делят на строительные стали (главным образом низкоуглеродистые) и машиностроительные (средне- и низкоуглеродистые). Инструментальные углеродистые стали (высокоуглеродистые) подразделяются на стали для режущего, мерительного и штамповочного инструментов.

Легированные стали по назначению делятся на конструкционные, инструментальные и стали с особыми свойствами.

Стали с особыми свойствами в зависимости от основных свойств подразделяют на:

1) коррозионностойкие (нержавеющие), к которым относятся стали, характеризующиеся стойкостью против электрохимической коррозии (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной и пр.);

2) жаростойкие (окалиностойкие), к которым относятся стали, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550°C, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии;

3) жаропрочные стали, к которым относятся стали, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и характеризующиеся при этом достаточной окалиностойкостью;

4) стали и сплавы с высоким омическим сопротивлением и другими специальными свойствами.

В зависимости от технологии обработки конструкционные низкоуглеродистые (машиностроительные и легированные стали, содержащие $\geq 0,35\%$ С) принято называть цементуемыми, а среднеуглеродистые — улучшаемыми, т. е. подвергаемыми закалке с высоким отпуском.

По качеству все стали делят на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные.

ОБОЗНАЧЕНИЯ МАРОК СТАЛЕЙ

Углеродистую сталь обыкновенного качества в зависимости от назначения, в соответствии с ГОСТ 380—71, подразделяют на три группы: А — сталь, поставляемую по механическим свойствам; Б — поставляемую по химическому составу; В — поставляемую по механическим свойствам и химическому составу. Буквы Б и В ставят перед маркой стали, группу А в обозначении марки стали не указывают.

Марки сталей обозначают буквами Ст, означающими «сталь», и цифрами от 0 до 6. Цифры представляют собой условный номер марки стали в зависимости от химического состава и механических свойств стали.

Для обозначения степени раскисления к обозначению марки стали после номера марки добавляют индексы: кп — кипящая, пс — полуспокойная, сп — спокойная. В том случае, когда не указана степень раскисления, в обозначении марки стали ничего не ставят либо ставят тире для отделения категории стали.

В зависимости от нормируемых показателей (механических свойств и (или) химического состава) сталь каждой группы подразделяют на категории: группы А — 1, 2, 3; группы Б — 1, 2; группы В — 1, 2, 3, 4, 5, 6. Эти цифры ставятся в конце обозначения марки стали. Первую категорию в обозначении марки стали не указывают (например, Ст3, БСт3, ВСт3сп, Ст3—2).

Для обозначения полуспокойной стали с повышенным содержанием марганца к обозначению марки стали после номера марки ставят букву Г, например Ст3Гпс.

Марки конструкционной углеродистой качественной стали (по ГОСТ 1050—60) обозначают: 05кп, 05, 08кп, 10, 15, 20, 30, 35 и т. д. (через 5 единиц) до 70; при повышенном содержании марганца справа от цифры ставится буква Г—50Г. Двухзначное число здесь — среднее содержание углерода в сотых долях процента, индекс «кп» — означает кипящую сталь, «пс» — полуспокойную.

Марки качественной углеродистой инструментальной стали (по ГОСТ 1435—54) обозначают У7, У8 и т. д. до У12 (У — углеродистая, цифра — среднее содержание углерода в десятых долях процента).

В обозначении марок высококачественных сталей в конце добавляют букву А (У8А).

В марках легированных сталей для легирующих элементов приняты следующие буквенные обозначения: алюминий — Ю, бор — Р, вана-

дий — Ф; вольфрам — В, кобальт — К; кремний — С; марганец — Г; медь — Д, молибден — М, никель — Н, ниобий — Б, титан — Т, фосфор — П, хром — Х, цирконий Ц. Марку легированной стали любой из групп составляют из букв, соответствующих обозначениям легирующих элементов. При этом, если содержание элемента превышает 1,5%, то справа от соответствующей ему буквы ставят цифру примерного его содержания в процентах.

Особо высококачественную сталь обозначают буквой Ш, через тире в конце наименования марки, например качественная 30ХГС; высококачественная 30ХГСА; особо высококачественная 30ХГС—Ш, 30ХГСА—Ш.

В начале марки, слева от букв, указывают среднее содержание углерода: для конструкционных сталей в сотых долях процента — двузначная цифра, для инструментальных, средне- и высоколегированных сталей с особыми свойствами в десятых долях процента — однозначная цифра. В последнем случае при очень малом содержании углерода (<0,08%) ставится цифра 0.

В марках некоторых инструментальных легированных сталей для режущего инструмента, в которых содержание углерода обычно близко к 1%, цифру не ставят.

Для некоторых групп легированных сталей обозначения марок отличаются от приведенных выше:

- А — автоматные стали;
- Р — быстрорежущие инструментальные стали;
- Ш — шарикоподшипниковые стали;
- Э — электротехнические стали;
- Е — стали для постоянных магнитов.

Эти буквы ставят в начале марки, за ними следуют буквы, цифры или буквы и цифры, имеющие в каждой группе свое условное значение.

Осваиваемые экспериментальные марки сталей обозначают буквами ЭИ и ЭП, за которыми следует число порядкового номера стали.

Если в конце обозначения имеется буква А, то данная марка стали относится к высококачественным сталям, более чистым по фосфору и сере, обладающим более высокими техническими свойствами. Л в конце марки обозначает сталь для отливок. Например, марка стали 1Х14Н14В2М (ЭИ257) означает, что содержание элементов в стали должно соответствовать следующему составу: 0,1% С; 14% Сг; 14% Ni; 2% W; 1% Мо.

В действительности химический анализ стали таков: 0,1% С; 15,3% Сг; 12,3% Ni; 2,76% W; 0,72% Мо; 0,43% Mn; 0,59% Si.

В соответствии с ГОСТ 5632—61, высоколегированные стали подразделяют на классы по виду структуры в зависимости от основной структуры, получаемой при охлаждении на воздухе после высокотемпературного нагрева, как показано ниже.

Класс стали ^{1,2}	Характеристика
МартенситныйСтали с основной структурой мартенсита
Мартенсито-ферритныйСтали, содержащие в структуре, кроме мартенсита, не менее 5—10% феррита

¹ При изменении скорости охлаждения принятые классы по структуре становятся условными. Так, при увеличении скорости охлаждения в стали перлитного класса можно получить мартенситную структуру и, наоборот, при замедленной скорости в стали мартенситного класса можно получить перлитную структуру.

² Сталь карбидного класса может иметь перлитную, мартенситную, аустенитную структуру.

Ферритный	Стали, имеющие структуру феррита
Аустенито-мартенситный	Стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменять в широких пределах
Аустенито-ферритный	Стали со структурой аустенита и феррита (феррита более 10%)
Аустенитный	Стали, имеющие структуру аустенита

Красочная маркировка стали разных марок

Наименование группы и марки стали Цвет окраски

ГОСТ 380—71

Сталь углеродистая обыкновенного качества, независимо от группы стали и степени раскисления:

Ст0	Красный + зеленый
Ст1	Белый + черный
Ст2	Желтый
Ст3	Красный
Ст4	Черный
Ст5	Зеленый
Ст6	Синий

ГОСТ 1050—60

Сталь углеродистая качественная конструкционная:

08—20	Белый
25—40	Белый + желтый
45—85	Белый + коричневый
15Г—40Г	Коричневый
50Г—70Г	Коричневый + зеленый

ГОСТ 4543—71

Сталь легированная конструкционная:

Хромистая	Зеленый + желтый
марганцовистая	Коричневый + синий
хромомарганцевая	Синий + черный
хромокремнистая	Синий + красный
хромомолибденовая и хромо-молибденованадиевая	Зеленый + фиолетовый
хромованадиевая	Зеленый + черный
никелемолибденовая	Желтый + фиолетовый
хромоникелевая и хромоникелевая с бором	Желтый + черный
хромокремнемарганцевая	Красный + фиолетовый
хромоникелемолибденовая	Фиолетовый + черный
хромоалюминиевая и хромоалюминиевая с молибденом	Алюминиевый

На продукцию из высоколегированной, коррозионностойкой, инструментальной быстрорежущей и других групп сталей наносят дополнительную цветную маркировку в соответствии с требованиями стандартов на конкретные виды продукции и, по требованию потребителя, цвета окраски устанавливают соглашением сторон.

Заводом-изготовителем либо выполняется окраска стали крупных размеров по торцам, а мелких — по концам прутков, либо на поверхность изделий наносится красочная маркировка через определенные интервалы.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СТАЛЕЙ

Общие количественные закономерности изменения коэффициента теплопроводности сплавов в зависимости от концентрации компонентов в настоящее время еще не определены. Известно, что при добавлении

другого компонента коэффициент теплопроводности, как правило, сначала резко уменьшается, а затем изменяется значительно слабее (рис. 17—19).

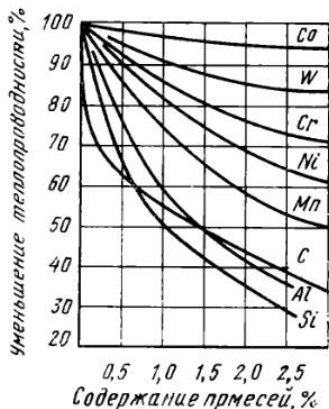


Рис. 17. Влияние примесей на теплопроводность железа

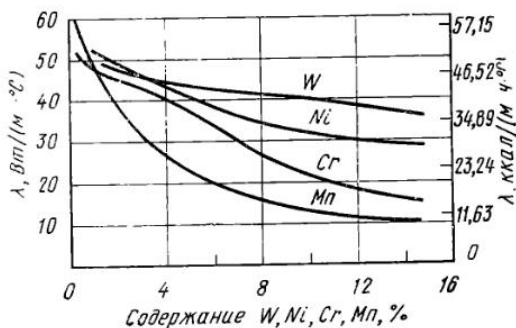


Рис. 18. Зависимость коэффициента теплопроводности стали от содержания легирующих W, Ni, Cr, Mn

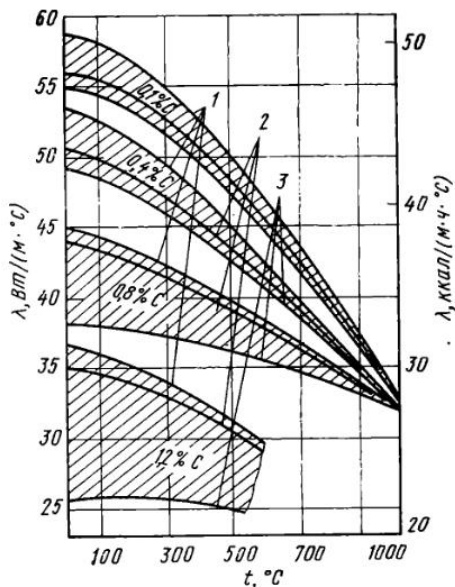


Рис. 19. Зависимость коэффициента теплопроводности сталей с различным содержанием углерода от температуры t и способа обработки: 1 — ковкая; 2 — отожженная при 200°C; 3 — закаленная в масле от 900°C

Теплопроводность электролитического (очень чистого) железа 94,4 Вт/(м·°C). Теплопроводность железа Армо (0,023% C, 0,007% Si, 0,025% Mn, 0,007% P и 0,02% S) — 78,4 Вт/(м·°C).

Влияние содержания примесей на теплопроводность железа видно на рис. 17.

Коэффициент теплопроводности значительно понижается при добавлении углерода к железу (до 0,2%); дальнейшее добавление углерода такого эффекта не дает (табл. IV-1).

Таблица IV-1

Теплопроводность железа с различным содержанием углерода в зависимости от температуры, Вт/(м·°C)

Сплав	Температура, °C						
	18	100	200	300	400	500	600
Железо чистое	67,6	63,4	—	—	—	—	—
Сталь (0,1% C)	—	54,6	—	50,0	—	—	37,2
Сталь (0,6% C)	—	41,9	—	33,7	—	—	29,1
Сталь (1% C)	45,4	43,4	—	—	—	—	—
Сталь (1,5% C)	—	36,1	—	33,7	—	—	29,1
Железо сварочное шведское .	—	55,4	52,0	48,5	45,0	39,8	—

Добавки марганца к сталям, содержащим $>0,15\%$ С, оказывают небольшое влияние на теплопроводность. Сталь 08, содержащая 0,05—0,12% С и 0,25—0,50% Мп, характеризуется теплопроводностью $\lambda = 53,2$, а сталь 10Г2 с таким же содержанием углерода и 1,2—1,6% Мп характеризуется теплопроводностью $\lambda = 49,6$ Вт/(м·°С). Таким образом, увеличение содержания марганца в 3—5 раз понижает теплопроводность на 12%. Значительное содержание марганца существенно влияет на коэффициент теплопроводности, который изменяется следующим образом:

Содержание марганца в стали, %	0,11	0,31	0,60	1,10	1,60	3,00	5,00	8,80
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	63,1	54,4	49,0	47,9	41,4	30,2	21,4	17,1

Влияние других примесей на теплопроводность сталей показано на рис. 18.

Теплопроводность зависит не только от чистоты металла, но и от величины зерна. Для переплавленного в вакууме электролитического железа, охлажденного с различной скоростью:

Среднее число зерен на 1 см одного и того же образца	11	175	644
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	93,0	90,0	84,0

Теплопроводность катаных и литых сталей различается незначительно, с некоторой тенденцией к увеличению для катаных сталей в области температуры до 600°С.

Различие в теплопроводности как по высоте, так и по сечению слитков литой стали также невелико: порядка 10—15%.

Теплопроводность слитков кипящей и спокойной стали, близких по химическому составу, практически не различается.

Термическая обработка стали, как правило, приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности.

Изменение теплопроводности сталей с различным содержанием углерода в зависимости от температуры нагрева и обработки видно из рис. 19. При 800—900°С теплопроводность сталей большинства марок составляет 30—33 Вт/(м·°С).

Теплопроводность окатины, образующейся на поверхности литой стали, в зависимости от температуры следующая:

Температура, °С	900	1000	1100	1200
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	1,45	1,63	1,86	2,10

Т а б л и ц а IV-2

Свойства структурных составляющих стали и чугуна

Свойства	Структурные составляющие				
	аустенит	феррит	цементит	перлит	графит
Удельная теплоемкость c , кДж/(кг·°С), при температуре, °С:					
100	0,50	0,4635	0,5987	—	0,8474
200	—	0,4861	0,6229	—	0,9412
300	—	0,5087	0,6238	—	1,0329
400	—	0,5338	0,6301	—	1,1183

Свойства	Структурные составляющие				
	аустенит	феррит	цементит	перлит	графит
500	—	0,5598	0,5543	—	1,1995
600	—	0,5933	0,6519	—	1,2853
700	—	0,6343	0,6527	—	1,3553
800	—	0,6908	0,6904	—	1,4486
900	—	0,7118	0,7159	—	1,5114
1000	—	—	—	—	1,5721
1100	—	—	—	—	1,6161
Коэффициент термического линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ см/(см·°C)	17,0—24,0	12,0—12,5	6,0—6,5	10,0—11,0	7,5—8,0
Теплопроводность λ , Вт/(м·°C)	41,9	76,8	7,1	51,9	155
Молекулярная или атомная масса	55,85	55,85	179,5	—	12,01

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТАЛЕЙ

Р. Е. Кржижановским предложен расчетный метод определения теплопроводности сталей, основанный на предположении, что при определенной термической обработке (отжиг для углеродистых и хромистых сталей и закалка или нормализация для сталей аустенитного класса) теплопроводность является функцией объемного содержания в стали всех элементов (кроме железа) и температуры. Объемное содержание примесей подсчитывают по формуле

$$V = \sum g_i \frac{A_{Fe}}{A_i} \%,$$

где V — суммарное объемное содержание примесей;
 g_i — массовое содержание элемента в стали, %;
 A — атомная масса.

Отношение A_{Fe}/A_i для различных элементов имеет следующее значение:

Элемент	C	Si [†]	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
A_{Fe}/A_i	4,66	1,99	1,02	1,86	1,74	1,07	0,952	0,582
Элемент	V	W	Co	Cu	Ti	Nb	Al	
A_{Fe}/A_i	1,09	0,32	0,947	0,878	1,16	2,07	0,60	

Точность расчетных методов проверена на большом экспериментальном материале.

а. Теплопроводность углеродистых сталей

Расчетная формула для коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры равна

$$\lambda = 33,5 + K (635 - t) 10^{-2} \text{ Вт/(м·°C)}.$$

Коэффициент K , зависящий от марки стали, можно определить по табл. IV-3, исходя из содержания основных элементов в металле.

$$V = 4,66 g_C + 1,99 g_{Si} + 1,02 g_{Mn}.$$

Здесь g_i — массовое содержание элемента в стали, %.

Таблица IV-3

Коэффициент K в зависимости от значения V

$V, \%$	K	$V, \%$	K	$V, \%$	K
0,2	6,49	1,6	3,39	4,5	2,55
0,4	5,91	1,8	3,22	5,0	2,51
0,6	5,39	2,0	3,09	5,5	2,43
0,8	4,85	2,5	2,93	6,0	2,36
1,0	4,35	3,0	2,85	6,5	2,30
1,2	3,93	3,5	2,72	7,0	2,26
1,4	3,64	4,0	2,64	—	—

Пределы применимости формулы: $V=0,2 \div 7\%$; $t=50 \div 500^\circ\text{C}$. Точность формулы $\sim 10 \div 12\%$.

б. Теплопроводность хромистых сталей

Теплопроводность хромистых сталей может быть определена по приводимой ниже табл. IV-4.

Таблица IV-4

Коэффициент теплопроводности λ хромистых сталей

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C}), \text{ при } V, \%$													
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
100	33,5	30,9	28,8	27,7	26,4	25,6	25,1	24,7	24,7	24,3	24,1	23,8	23,5	23,3
200	32,7	30,1	28,5	27,2	26,5	25,9	25,7	25,6	25,1	24,9	24,7	24,3	24,3	23,8
300	31,4	29,3	28,0	27,2	26,6	26,2	25,9	25,9	25,6	25,6	25,6	25,4	25,1	25,1
400	30,1	28,6	27,6	27,2	26,7	26,4	26,2	25,9	25,9	25,9	28,6	28,6	28,6	28,6
500	28,8	28,0	27,4	26,9	26,7	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
600	27,7	27,2	26,6	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7

Пределы применимости: $V=4 \div 30\%$; $t=100 \div 600^\circ\text{C}$. Точность метода 10—15%.

в. Теплопроводность сталей аустенитного класса

Расчетная формула для коэффициента теплопроводности

$$\lambda = 13,85 + 15,45t \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Пределы применимости: для всех сталей аустенитного класса при $t=50 \div 900^\circ\text{C}$. Точность формулы 10—15%.

г. Теплопроводность углеродистых сталей

Б. Е. Неймарк приводит формулу для определения коэффициента теплопроводности углеродистых сталей, выведенную на основании обобщения большого числа экспериментальных данных, а также формулу для определения коэффициента теплопроводности хромоникелевых аустенитных сталей. Формулы Б. Е. Неймарка дают большую точность по сравнению с формулами Р. Е. Кржижановского, но имеют меньшие пределы по количеству легирующих элементов, содержащихся в стали.

Коэффициент теплопроводности углеродистых сталей λ рассчитывают по уравнению

$$\lambda = a - b \Sigma + c \Sigma^2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

$$a = 76,8 - 6,68 \cdot 10^{-2} t;$$

где

$$b = 34,2 - 9,9 \cdot 10^{-2} t + 0,815 \cdot 10^{-4} t^2;$$

$$c = 9,31 - 3,96 \cdot 10^{-2} t + 0,418 \cdot 10^{-4} t^2;$$

Σ — суммарная добавка остальных элементов (C, Si, Mn и др.) к железу, % (по массе).

Формула пригодна для значений Σ от 0,1 до 2,0 и температуры $\leq 500^\circ\text{C}$ (табл. IV-5). Точность формулы $\pm 4\%$.

Таблица IV-5

Коэффициент теплопроводности λ углеродистых сталей

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \text{ при } \Sigma, \% \text{ (по массе)}$										
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0	73,4	70,2	64,5	59,5	55,4	51,9	48,1	47,1	45,9	45,5	45,6
50	70,5	67,8	62,8	58,5	54,7	51,5	49,0	46,9	45,4	44,7	44,3
100	67,6	65,2	60,8	57,0	53,6	50,7	48,3	46,3	44,7	43,7	43,0
200	61,5	59,9	56,6	53,7	51,0	48,6	46,4	44,4	42,8	41,2	40,0
300	55,6	54,4	52,2	50,1	47,9	46,1	44,2	42,4	41,1	39,2	37,7
400	49,2	48,5	47,0	45,7	44,0	42,6	41,2	39,8	38,3	37,0	35,6
500	42,9	42,3	41,3	40,4	39,3	38,8	37,2	36,2	35,1	34,3	33,4

д. Теплопроводность хромоникелевых аустенитных сталей

Теплопроводность хромоникелевых аустенитных сталей λ рассчитывают по уравнению

$$\lambda = 15,5 - a + (1,28 + b) 10^{-2} t \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

где $a=11,6$ ($\sigma=0,5$); $b=1,34$ ($\sigma=0,5$);

σ — суммарная добавка, г-атом/100 г стали. Величину σ рассчитывают по уравнению

$$\sigma = \frac{C}{12} + \frac{Si}{28} + \frac{Mn}{55} + \frac{Cr}{52} + \frac{Ni}{59} + \frac{W}{184} + \frac{Nb}{93} + \frac{Mo}{96} + \text{и т. д.}$$

C, Si, Mn и т. д. — содержание в стали соответствующего элемента, % (по массе);

12, 28, 55 и т. д. — атомная масса этого элемента.

Формула пригодна для значений σ от 0,5 до 0,8 и температуры до 900°C (табл. IV-6). Точность формулы $\pm 4\%$.

Таблица IV-6

Коэффициент теплопроводности λ хромоникелевых аустенитных сталей

σ	λ , Вт/(м·°C), при температуре, °C								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0,50	16,6	17,9	19,2	20,6	21,9	23,1	24,4	25,7	26,9
0,55	16,3	17,6	18,9	20,2	21,6	22,9	24,3	25,7	26,9
0,60	15,7	17,1	18,6	20,0	21,4	22,8	24,2	25,6	26,9
0,65	15,1	16,5	18,1	19,5	21,2	22,6	24,1	25,5	26,9
0,70	14,7	16,3	17,8	19,3	20,9	22,4	23,9	25,5	26,9
0,75	14,2	15,8	17,4	19,1	20,6	22,2	23,8	25,5	26,9
0,80	13,7	15,4	16,9	18,7	20,4	22,1	23,7	25,5	26,9

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ
ПО ДАННЫМ РАЗЛИЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Ниже приведены таблицы и графики, полученные на основании обработки экспериментального материала, для определения теплофизических характеристик различных сталей: коэффициента теплопроводности λ , плотности ρ , теплоемкости c , коэффициента линейного расширения β , удельного электросопротивления ρ_a .

Если в приведенных ниже материалах отсутствуют данные для необходимой марки стали, то можно воспользоваться имеющимися значениями для другой стали, близкой по химическому составу. При этом надо помнить, что чем больше примесей в металле, тем меньше коэффициент теплопроводности. Другие теплофизические свойства сталей меняются менее существенно.

Линейную интерполяцию и особенно экстраполяцию экспериментальных данных нужно выполнять с большой осторожностью. Если в стали происходят структурные или фазовые превращения, то такие операции нельзя распространять на эти диапазоны температур.

Для многих сталей влияние температуры на коэффициент теплопроводности может быть учтено на основании следующих данных:

Для сталей с коэффициентом теплопроводности $\lambda_0 > 46$ Вт/(м·°C):

Температура, °C	0	200	400	600	800	1000	1200
λ_t	λ_0	$0,95 \lambda_0$	$0,85 \lambda_0$	$0,75 \lambda_0$	$0,68 \lambda_0$	$0,68 \lambda_0$	$0,73 \lambda_0$

Для сталей с коэффициентом теплопроводности $\lambda_0 < 46$ Вт/(м·°C):

$$\begin{aligned} \lambda_{200} &= (1,07 - 0,0032 \lambda_0) \lambda_0; & \lambda_{800} &= (1,46 - 0,021 \lambda_0) \lambda_0; \\ \lambda_{400} &= (1,22 - 0,01 \lambda_0) \lambda_0; & \lambda_{1000} &= (1,46 - 0,021 \lambda_0) \lambda_0; \\ \lambda_{600} &= (1,36 - 0,017 \lambda_0) \lambda_0; & \lambda_{1200} &= (1,37 - 0,017 \lambda_0) \lambda_0. \end{aligned}$$

1. Углеродистые стали

Таблица IV-7

Химический состав исследованных углеродистых сталей, %

Марка	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	As	Режим термической обработки: отжиг при $t, ^\circ\text{C}$
08кп	0,06	0,01	0,38	0,035	0,017	0,022	0,055	0,030	0,08	0,001	0,039	930
08	0,08	0,08	0,31	0,050	0,029	0,045	0,07	0,020	Следы	0,002	0,032	930
20	0,23	0,11	0,635	0,034	0,034	Следы	0,074	—	0,13	0,010	0,036	930
04	0,415	0,11	0,643	0,029	0,031	»	0,063	—	0,12	0,006	0,033	860
У8	0,80	0,13	0,32	0,009	0,008	0,11	0,13	0,01	0,070	0,004	0,021	800
У8'	0,84	0,13	0,24	0,014	0,014	Следы	Следы	—	0,020	0,004	0,008	—
У12	1,22	0,16	0,35	0,015	0,009	0,11	0,13	0,01	0,077	0,006	0,025	800

Таблица IV-8

Критические точки фазовых превращений углеродистых сталей, $^\circ\text{C}$

Марка	A_{c_1}	A_{c_3}	A_{r_1}	A_{r_3}	Марка	A_{c_1}	A_{c_3}	A_{r_1}	A_{r_3}	Марка	A_{c_1}	A_{c_3}	A_{r_1}	A_{r_3}
08кп	743	—	—	—	15	735	863	685	840	40	733	—	—	—
08	738	—	—	—	20	738	854	682	835	У8	734	—	—	—
10	732	874	680	854	30	732	813	677	796	У12	738	—	—	—

Таблица IV-9

Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), углеродистых сталей различных марок в зависимости от температуры

Температура, °С	Марка стали						
	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
0	65,1	59,5	51,9	51,9	49,8	51,1	45,2
50	62,8	58,6	51,5	51,5	49,4	50,2	45,2
100	60,2	57,7	51,1	50,6	48,1	48,9	44,8
150	57,7	55,2	49,9	49,8	46,9	47,7	42,4
200	55,6	53,5	48,5	48,1	45,1	46,1	42,7
250	53,0	51,5	46,5	46,9	43,0	43,9	41,1
300	50,9	49,4	44,4	45,6	41,4	41,9	40,2
350	48,5	47,7	43,6	44,3	40,2	40,2	38,5
400	46,5	44,8	42,7	41,9	38,1	37,6	37,2
450	43,5	42,3	41,1	40,0	36,4	36,9	36,1
500	41,1	40,2	39,3	38,1	35,2	35,6	34,7
550	39,4	38,1	37,7	36,1	33,9	34,4	33,5
600	37,4	36,1	35,6	33,6	32,7	33,3	31,9
650	36,1	33,9	33,9	31,9	31,4	31,9	30,0
700	33,9	31,9	31,9	30,0	30,1	30,7	28,3
750	31,9	29,8	28,5	26,9	26,9	27,3	26,9
800	30,1	28,5	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
850	27,7	27,2	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
900	27,2	26,7	26,4	25,7	25,7	25,2	24,8
950	27,2	27,2	27,2	26,1	26,5	26,1	25,7
1000	27,7	27,7	27,7	26,9	26,9	26,9	26,1
1050	28,0	28,0	28,0	27,2	27,7	27,7	26,9
1100	28,5	28,5	28,5	28,0	28,6	28,6	27,2
1150	29,3	29,3	29,3	28,7	29,4	28,7	28,0
1200	29,8	29,8	29,8	29,5	30,2	29,5	28,6

Таблица IV-10

Средняя теплоемкость $c_{ср}$, кДж/(кг·°С), углеродистых сталей различных марок в интервале температур от 50 до $t^{\circ}\text{C}$

Температура, °С	Углеродистые стали							
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
100	0,469	0,486	0,486	0,486	0,486	0,486	0,502	0,486
150	0,477	0,594	0,494	0,494	0,494	0,502	0,511	0,502
200	0,489	0,502	0,502	0,502	0,498	0,515	0,523	0,815
250	0,498	0,511	0,511	0,511	0,507	0,523	0,523	0,523
300	0,511	0,519	0,519	0,519	0,515	0,532	0,519	0,532
350	0,519	0,528	0,528	0,528	0,523	0,540	0,544	0,540
400	0,528	0,536	0,540	0,540	0,532	0,548	0,553	0,544
450	0,536	0,548	0,548	0,548	0,544	0,557	0,565	0,557
500	0,553	0,561	0,561	0,561	0,557	0,589	0,574	0,565
550	0,561	0,574	0,578	0,574	0,569	0,582	0,586	0,578

Температура, °С	Углеродистые стали							
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
600	0,578	0,590	0,590	0,590	0,582	0,595	0,503	0,586
650	0,595	0,611	0,607	0,607	0,595	0,603	0,615	0,599
700	0,615	0,628	0,628	0,628	0,607	0,619	0,632	0,615
750	0,641	0,645	0,662	0,669	0,678	0,724	0,745	0,720
800	0,657	0,678	0,682	0,703	0,674	0,716	0,737	0,716
850	0,666	0,682	0,695	0,703	0,662	0,712	0,729	0,712
900	0,666	0,695	0,703	0,703	0,657	0,708	0,724	0,708
950	0,682	0,691	0,609	0,699	0,653	0,703	0,716	0,703
1000	0,678	0,691	0,695	0,695	0,653	0,699	0,712	0,699
1050	0,669	0,691	0,695	0,691	0,653	0,695	0,708	0,695
1100	0,666	0,691	0,695	0,691	0,649	0,695	0,703	0,695
1150	0,666	0,687	0,691	0,691	0,649	0,691	0,707	0,691
1200	0,666	0,687	0,691	0,687	0,649	0,691	0,699	0,691
1250	0,662	0,687	0,691	0,687	0,653	0,691	0,699	0,691
1300	0,662	0,699	0,687	0,687	0,653	0,691	0,699	0,687

Таблица IV-11

Средняя теплоемкость $c_{ср}$, кДж/(кг·°С) углеродистых сталей

Интервал температур, °С	Углеродистые стали							
	Чистое железо 99,99%	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
50—100	0,469	0,481	0,481	0,486	0,486	0,489	0,498	0,486
100—150	0,489	0,502	0,502	0,507	0,502	0,519	0,523	0,519
150—200	0,511	0,519	0,523	0,519	0,515	0,532	0,544	0,540
200—250	0,528	0,536	0,544	0,532	0,528	0,548	0,548	0,544
250—300	0,544	0,553	0,557	0,557	0,548	0,565	0,565	0,557
300—350	0,565	0,574	0,569	0,574	0,569	0,586	0,552	0,578
350—400	0,586	0,595	0,595	0,599	0,586	0,607	0,603	0,599
400—450	0,611	0,624	0,624	0,624	0,611	0,628	0,632	0,615
450—500	0,649	0,662	0,662	0,662	0,649	0,669	0,666	0,636
500—550	0,691	0,708	0,695	0,703	0,691	0,695	0,708	0,662
550—600	0,733	0,754	0,741	0,749	0,708	0,716	0,749	0,699
600—650	0,775	0,799	0,791	0,787	0,733	0,720	0,779	0,745
650—700	0,829	0,867	0,858	0,846	0,770	0,770	0,833	0,816
700—750	0,971	1,105	1,139	0,432	1,583	2,081	2,186	2,089
750—800	0,913	0,875	0,959	0,950	0,624	0,615	0,632	0,649
800—850	0,754	0,795	0,867	0,737	0,502	0,657	0,619	0,657
850—900	0,716	0,849	0,816	0,649	0,548	0,619	0,619	0,619
900—950	0,946	0,662	0,649	0,649	0,624	0,624	0,619	0,619
950—1000	0,557	0,669	0,657	0,649	0,624	0,632	0,615	0,628
1000—1050	0,582	0,669	0,657	0,649	0,632	0,645	0,628	0,636
1050—1100	0,599	0,669	0,662	0,649	0,632	0,653	0,636	0,641
1100—1150	0,615	0,669	0,662	0,657	0,641	0,662	0,653	0,649
1150—1200	0,632	0,669	0,666	0,666	0,653	0,669	0,669	0,657
1200—1250	0,649	0,669	0,666	0,678	0,669	0,678	0,678	0,666
1250—1300	0,669	0,669	0,666	0,687	0,687	0,678	0,695	0,674

Таблица IV-12

Удельная энтальпия углеродистых сталей i , кДж/кг

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	Углеродистые стали							
	Чистое железо	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
100	46,89	48,57	48,57	48,56	48,57	48,57	50,24	48,57
150	71,59	74,11	74,11	74,11	74,11	75,36	76,62	75,36
200	97,97	100,48	100,48	100,48	99,65	102,99	104,67	102,99
250	124,56	127,69	127,69	127,69	126,84	130,84	130,84	130,84
300	153,24	175,55	155,75	155,75	154,49	159,52	155,75	159,52
350	181,71	184,64	184,64	184,64	183,17	189,03	190,49	189,03
400	211,01	214,36	216,04	216,04	212,69	219,39	221,06	217,72
450	241,16	246,81	246,81	246,81	244,93	250,58	254,35	250,58
500	276,33	280,52	280,52	280,52	278,42	284,70	286,79	282,61
550	308,57	315,48	317,78	315,48	213,17	320,08	322,38	317,78
600	367,67	354,20	354,20	354,20	349,18	356,72	361,74	351,69
650	386,44	397,33	394,61	394,61	386,44	391,88	400,05	389,16
700	430,82	439,61	439,61	439,61	424,96	433,75	442,54	430,82
750	480,44	483,58	496,14	502,42	508,59	543,24	558,94	540,09
800	525,86	542,61	545,96	562,71	539,26	572,75	589,50	572,75
850	565,85	580,08	590,76	597,88	562,29	604,99	619,23	604,99
900	599,13	625,51	633,04	633,04	591,59	636,81	651,88	636,81
950	648,33	686,28	664,24	664,24	620,48	668,28	680,15	668,21
1000	678,6	690,82	729,76	695,00	653,14	699,19	711,76	699,19
1050	703,38	725,36	698,00	725,36	685,70	729,76	742,95	729,76
1100	732,27	709,90	704,51	759,90	713,85	764,51	773,72	764,51
1150	769,74	789,63	794,45	794,45	746,29	794,45	808,89	794,45
1200	798,84	823,96	828,99	823,96	778,74	828,99	839,03	828,99
1250	826,89	858,29	863,53	858,29	816,43	863,63	873,99	863,83
1300	859,97	908,95	892,63	892,63	849,08	898,07	908,95	892,63

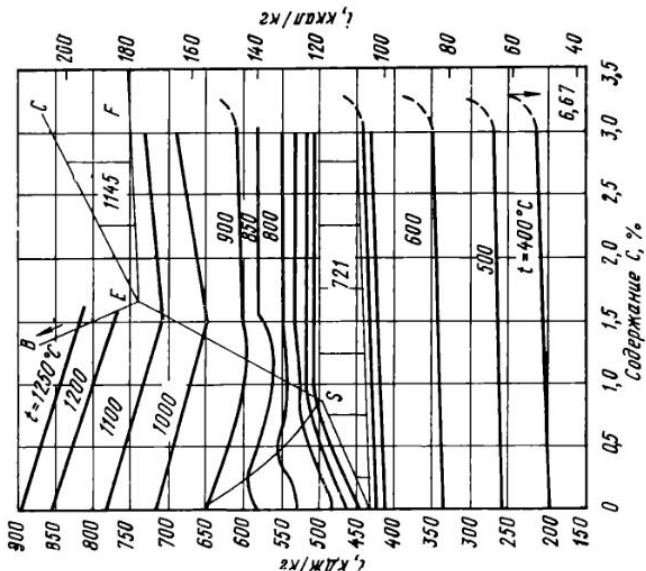
Рис. 20. Зависимость энтальпии i углеродистых сталей от температуры t

Таблица IV-13

Плотность углеродистых сталей ρ , г/см³

Температура, °C	Углеродистые стали					
	08кп	08	20	30	У8	У12
0	7,876	7,861	7,863	7,858	7,855	7,834
15	7,871	7,856	7,859	7,854	7,851	7,830
50	7,861	7,847	7,849	7,845	7,842	7,822
100	7,846	7,832	7,834	7,832	7,829	7,809
150	7,830	7,846	7,819	7,817	7,815	7,796
200	7,814	7,800	7,803	7,801	7,800	7,781
250	7,798	7,783	7,787	7,784	7,784	7,765
300	7,781	7,765	7,770	7,766	7,767	7,749
350	7,763	7,748	7,753	7,748	7,749	7,731
400	7,745	7,730	7,736	7,730	7,731	7,713
450	7,727	7,711	7,718	7,711	7,713	7,694
500	7,708	7,692	7,699	7,692	7,694	7,675
550	7,688	7,673	7,679	7,672	7,675	7,655
600	7,668	7,653	7,659	7,652	7,655	7,634
650	7,648	7,632	7,635	7,628	7,632	7,613
700	7,628	7,613	7,617	7,613	7,612	7,592
750	7,610	7,594	7,620	7,624	7,604	7,581
800	7,598	7,582	7,624	7,635	7,594	7,565
850	7,601	7,589	7,616	7,617	7,565	7,528
900	7,602	7,594	7,600	7,590	7,533	7,489
950	7,580	7,572	7,574	7,564	7,509	7,463
1000	7,550	7,543	7,548	7,538	7,485	7,438
1050	7,523	7,515	7,522	7,512	7,460	7,413
1100	7,495	7,488	7,496	7,486	7,436	7,388

Рис. 21. Зависимость коэффициента температуропроводности α некоторых легированных сталей от температуры:

1 — 30Г2; 2 — 30ХН3; 3 — 50С2Г; 4 — Р18;
5 и 6 — хромоникелевые аустенитные стали; 7 — Г13

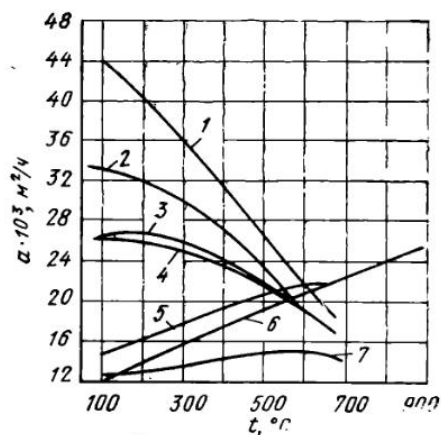


Таблица IV-14

Коэффициент температуропроводности углеродистых сталей α , м²/ч

Интервал температур, °C	Углеродистые стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
50—100	0,059	0,055	0,049	0,048	0,046	0,043
100—150	0,053	0,052	0,046	0,046	0,042	0,040
150—200	0,050	0,048	0,044	0,044	0,040	0,038
200—250	0,047	0,045	0,041	0,041	0,037	0,036
250—300	0,044	0,042	0,038	0,039	0,035	0,034
300—350	0,040	0,040	0,036	0,037	0,032	0,032
350—400	0,037	0,036	0,033	0,034	0,030	0,029

Интервал температур, °С	Углеродистые стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
400—450	0,034	0,033	0,031	0,031	0,028	0,028
450—500	0,030	0,029	0,028	0,028	0,025	0,026
500—550	0,027	0,026	0,026	0,025	0,023	0,024
550—600	0,024	0,023	0,023	0,023	0,022	0,022
600—650	0,022	0,021	0,021	0,021	0,021	0,020
650—700	0,019	0,018	0,018	0,019	0,019	0,017
700—750	0,014	0,013	0,010	0,009	0,007	0,006
750—800	0,017	0,014	0,014	0,020	0,020	0,019
800—850	0,017	0,015	0,017	0,018	0,019	0,019
850—900	0,015	0,016	0,019	0,019	0,019	0,019
900—950	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,019
950—1000	0,019	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
1000—1050	0,020	0,020	0,021	0,020	0,020	0,020
1050—1100	0,020	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021

Таблица IV-15

Средний коэффициент линейного расширения β_{10}^6 , $1/^\circ\text{C}$, углеродистых сталей для интервала температур от 0 до $t^\circ\text{C}$

Температура, °С	Углеродистые стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
50	12,38	11,74	11,92	10,72	10,84	10,30
100	12,62	12,19	12,18	11,21	11,11	10,60
150	12,86	12,63	12,43	11,69	11,39	10,90
200	13,08	12,99	12,66	12,14	11,72	11,25
250	13,27	13,27	12,88	12,60	12,11	11,68
300	13,46	13,51	13,08	13,00	12,49	12,11
350	13,64	13,71	13,27	13,31	12,84	12,51
400	13,83	13,91	13,47	13,58	13,15	12,88
450	14,04	14,11	13,67	13,82	13,41	13,21
500	14,25	14,30	13,92	14,05	13,65	13,53
550	14,45	14,49	14,17	14,33	13,90	13,85
600	14,65	14,68	14,41	14,58	14,16	14,16
650	14,88	14,91	14,85	14,98	14,56	14,50
700	15,00	15,05	14,88	14,85	14,74	14,69
750	15,01	15,10	13,75	13,22	14,19	14,38
800	14,72	14,79	12,64	11,84	13,83	14,33
850	13,68	13,57	12,33	12,04	14,45	15,32
900	12,89	12,60	12,41	12,65	15,19	16,33
950	13,20	12,88	12,91	13,14	15,47	16,60
1000	13,79	13,49	13,37	13,59	15,72	16,84
1050	14,24	13,96	13,78	13,99	15,95	17,06
1100	14,65	14,38	14,16	14,36	16,15	17,26
1150	15,02	14,77	14,50	14,69	16,34	17,44
1200	15,37	15,12	14,81	15,00	16,52	17,60

Таблица IV-16

Удельное электросопротивление углеродистых сталей $\rho \cdot 10^6$, Ом·см

Температура, °С	Углеродистые стали						
	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
0	12,0	13,2	15,9	16,0	17,0	16,5	18,4
20	13,0	14,2	16,9	17,1	18,0	17,6	19,6
50	14,7	15,9	18,7	18,9	19,8	19,4	21,6
100	17,8	19,0	21,9	22,1	23,2	22,8	25,2
150	21,3	22,4	25,4	25,7	26,8	26,3	29,0
200	25,2	26,3	29,2	29,6	30,8	30,3	33,3
250	29,5	30,5	33,4	33,9	35,1	34,6	37,9
300	34,1	35,2	38,1	38,7	39,8	39,2	43,0
350	39,3	40,2	43,2	43,8	45,0	44,3	48,3

Температура, °C	Углеродистые стали						
	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
400	44,8	45,8	48,7	49,3	50,5	49,8	54,0
450	50,9	51,8	54,6	55,3	56,5	55,7	60,1
500	57,5	58,4	60,1	61,9	62,8	62,2	66,5
550	64,8	65,7	68,2	68,9	69,9	69,2	73,4
600	72,5	73,4	75,8	76,6	77,2	76,7	80,2
650	80,7	81,6	83,7	84,4	85,2	84,3	87,8
700	89,8	90,5	92,5	93,2	93,5	92,7	96,4
750	100,3	101,1	105,0	107,9	110,5	110,7	113,0
800	107,3	108,1	109,4	111,1	112,9	112,9	115,2
850	110,4	111,1	111,8	113,1	114,8	114,9	117,6
900	112,4	113,0	113,6	114,9	116,4	116,6	119,6
950	114,2	114,8	115,2	116,6	117,8	118,2	121,2
1000	116,0	116,5	116,7	117,9	119,1	119,7	122,6
1050	117,5	117,9	118,1	119,3	120,4	120,9	123,8
1100	118,9	119,3	119,4	120,7	121,4	122,2	124,9
1150	120,3	120,7	120,7	122,0	122,3	123,5	126,0
1200	121,7	122,0	121,9	123,0	123,1	124,6	127,1
1250	123,0	123,3	122,9	124,0	123,8	125,9	128,2
1300	124,1	124,4	123,9	—	124,6	126,7	128,7
1350	125,2	125,3	125,1	—	125,0	127,4	129,5

Рис. 22. Зависимость удельной электропроводности k эвтектоидной стали от температуры t

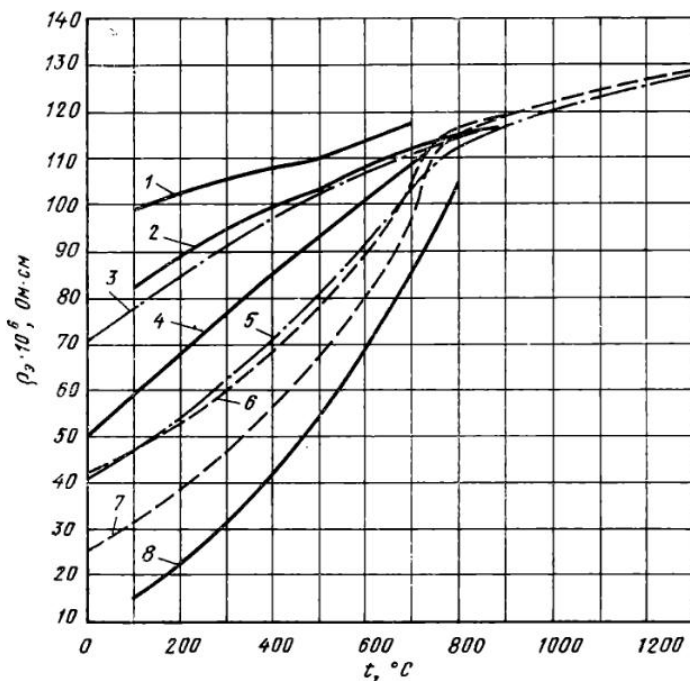
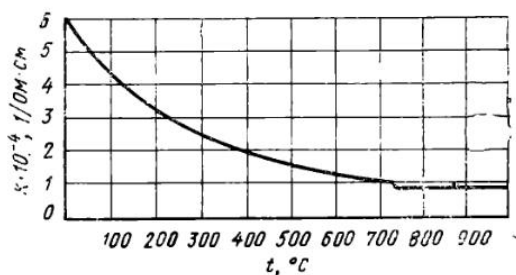


Рис. 23. Зависимость удельного электрического сопротивления ρ_z некоторых легированных сталей и армо-железа от температуры:

- 1 — X18H25C2; 2 — X14H14B2M; 3 — X18H9T; 4 — хромистые нержавеющие стали; 5 — P18; 6 — 50C2Г; 7 — 30XН3А; 8 — армо-железо

Таблица IV-17

Теллофизические свойства некоторых углеродистых сталей в зависимости от температуры

Марка стали	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$, 1/°C										Теплопроводность λ , Вт/(м·°C)										Теплоемкость c , кДж/(кг·°C)
		Температура, °C										Температура, °C										
		20—100	20—200	20—300	20—400	20—500	20—600	100	200	300	400	500	600	0—100	0—200	0—400	0—500					
25	7,85	11,1	12,3	—	13,3	—	14,3	—	50,6	48,5	—	35,6	0,469	0,482	0,524	0,570						
35	7,85	11,1	11,9	—	13,4	—	14,4	—	50,6	48,5	—	35,6	0,469	0,482	0,524	0,570						
45	7,85	12,0	12,4	—	13,3	—	14,1	—	48,1	46,5	—	36,1	0,469	0,482	0,524	0,574						
15K, 20K	7,85	—	11,8—12,1	12,4—13,1	13,1—13,3	13,4—13,7	13,85	—	57,0	52,7	—	37,5	0,469	0,482	0,524	0,570						
22K, 25K	7,85	—	11,6—12,8	12,4—13,4	13,0—13,6	13,6—14,2	13,96*2	—	49,4	46,5	—	45,3	—	—	—	—						
22ГК	7,85	10,53*1	11,77*1	12,58*1	13,12*1	13,66*1	14,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
50Г	—	11,6	11,9	—	13,8	—	—	—	—	38,4	37,8	—	0,474	0,482	0,524	0,545						
35Г2, 40Г2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37,8	38,2	—	—	—	—	—						
50Г2	—	—	—	—	—	—	—	—	40,4	39,9	—	—	—	—	—	—						

* Значения температур не от 20°C, а от 25°C. ** Интервал температур от 25 до 550°C.

2. Низколегированные стали

Таблица IV-18

Химический состав исследованных низколегированных сталей*, %.

Номер марки стали	Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Ti	V	W	Cu	Режим термической обработки	Температурный интервал исследований, °C
1	15ХМ	≤0,16	0,4—0,7	0,17—0,37	0,8—1,1	0,4—0,55	≤0,3	—	—	—	—	—	20—600
2	30ХМА	0,25—0,35	0,4—0,7	0,17—0,37	0,8—1,1	0,15—0,25	≤0,3	—	—	—	—	—	20—700
3	15ХФ	0,15	0,57	0,56	1,08	—	—	—	0,30	—	—	—	0—1100
4	30Х	0,315	0,69	0,20	1,09	—	0,073	—	—	—	0,060	Отжиг, 860°C	20—900
5	12ХН2	0,13	0,33	0,19	0,39	—	2,18	—	—	—	—	—	20—900
6	12ХН3	0,15	0,47	0,37	0,70	—	2,95	—	—	—	—	—	20—900

Продолжение табл. IV.18

Номер марки стали	Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Ti	V	W	Cu	Режим термической обработки	Температурный интервал исследований, °С
7	20XН3	0,26	0,45	0,32	1,04	—	3,41	—	—	—	—	—	20—900
8	30XН3	0,33	0,53	0,17	0,80	0,07	3,38	—	—	—	0,053	Отжиг, 860°С, затем нагрев до 640°С и охлаждение в печи	0—1100
9	12XН3А	0,12	0,35	0,23	0,77	—	2,90	—	—	—	—	—	20—600
10	20XН4Ф	0,19	0,30	0,34	1,05	—	4,35	—	—	—	—	—	20—900
11	18X2Н4ВА	0,19	0,43	0,48	1,42	—	4,33	—	—	1,1	—	—	20—900
12	X6M	≤0,15	≤0,5	≤0,5	5—6,5	—	≤0,6	—	0,15—0,25	0,45—0,6	—	—	0—700
13	30Г2	0,23	1,51	0,12	0,06	0,025	0,04	—	—	—	0,125	Отжиг, 860°С	0—1300
14	30XГC	0,36	0,90	1,05	1,04	—	—	—	—	—	—	—	20—800
15	15M	0,10—0,18	0,4—0,7	0,17—0,37	≤0,3	0,4—0,55	≤0,3	—	—	—	—	—	—
16	12MX	0,15	0,54	0,28	0,52	0,50	—	—	—	—	—	Отжиг, 930°С	20—900
17	20XM	0,15—0,25	0,4—0,7	0,15—0,30	0,8—1,1	0,15—0,25	≤0,3	—	—	—	—	—	—
18	12XMФ	≤0,12	0,4—0,6	0,2—0,4	0,9—1,2	0,25—0,35	—	—	0,15—0,3	—	—	Нагрев, 740°С, охлаждение с печью	20—900
19	10X2Ф	0,08	0,27	0,21	1,55	—	—	—	0,31	—	—	То же	—
20	10X2ФТ	0,09	0,25	0,44	1,62	—	—	—	0,35	—	—	—	20—900
21	10X2ФМ	0,08	0,32	0,22	1,55	0,18	—	0,1	0,35	—	—	—	20—900
22	10X2ФВ	0,09	0,27	0,42	1,53	—	—	—	0,4	0,72	—	—	20—900
23	10X2МФ (ЭИ531)	≤0,12	0,4—0,7	0,4—0,7	2,1—2,6	0,5—0,7	—	—	0,2—0,35	—	—	—	—
24	10X2МБ (ЭИ454)	≤0,12	0,4—0,7	0,4—0,7	2,1—2,6	0,8—1,0	—	—	—	—	Nb 1,3	—	—
25	25X2МФ (ЭИ10)	0,22—0,30	0,4—0,7	0,17—0,37	1,6—1,8	0,25—0,35	≤0,3	—	0,2—0,3	—	—	—	20—600
26	40X3М	0,4	0,6	0,3	3,0	0,5	—	—	—	0,2	—	—	20—800
27	20X3ФВМ	0,23	—	—	2,7	0,5	0,3	—	—	0,75	—	—	20—800
28	12X5СМА	≤0,15	0,4—0,7	1,5—2,0	5—6,5	0,5	≤0,5	—	—	—	0,5	—	0—700
29	50С2Г	0,485	0,90	1,98	0,04	—	0,156	—	—	—	—	Отжиг, 930°С	0—1300
30	30Н3	0,325	0,55	0,18	0,17	0,04	3,47	—	—	—	—	Отжиг, 860°С	0—1300

Примечания: 1. Сталь № 15—29 негостированная. 2. Сталь после эксплуатации подвергалась нормализации, затем закалке в масле и отпуску при 720°С.
* Марка обозначена не по ГОСТу, а по химическому составу стали.

Таблица IV-19

Критические точки фазовых превращений сталей, °С

Номер марки стали	Марка стали	A_{c1}	A_{c2}	A_{r1}	A_{rs}	Номер марки стали	Марка стали	A_{c1}	A_{c2}	A_{r1}	A_{rs}
1	15ХМ	770	850—870	—	—	3	15ХФ	800	890	775	825
2	30ХМА	757	807	693	763	19	10Х2Ф	825	900	790	860
4	30Х	763	—	—	—	20	10Х2ФТ	852	922	—	—
8	30ХНЗ	725	—	—	—	21	10Х2ФМ	820	900	750	860
12	Х6М	850	850	—	—	22	10Х2ФВ	910	945	—	—
13	30Г2	730	—	—	—	28	12Х5СМА	850	890	—	—
15	15М	730	930	610	830	29	50С2Г	779	—	—	—
16	12МХ	755	860	760	820	30	30НЗ	705	760	610	—

Таблица IV-20

Коэффициент теплопроводности низколегированных сталей λ , Вт/(м·°С)

Номер марки стали	Марка стали	Температура t , °С												
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	
1	15М	—	45,3	43,6	42,4	40,7	37,2	36,1	32,6	31,4	30,2	—	—	—
2	20М	—	44,8	43,0	41,9	40,1	37,2	36,1	32,6	31,4	29,1	—	—	—
3	12МХ	44,8	43,8	42,6	41,2	39,3	36,9	—	—	—	—	—	—	—
3а	12МХ	42,4	42,1	41,8	40,6	38,9	37,1	38,4	—	—	—	—	—	—
3б	12МХ	45,00	44,5	43,1	40,9	38,7	36,9	34,7	33,6	32,2	30,8	—	—	—
4	15ХМ	—	44,2	41,3	40,7	38,9	36,1	33,7	—	—	—	—	—	—
5	20ХМ	—	43,6	41,3	40,7	38,9	36,1	37,2	—	—	—	—	—	—
6	30ХМА	—	41,9	40,7	39,5	38,4	—	—	—	—	—	—	—	—
7	12ХМФ	—	44,2	41,3	40,7	38,9	36,1	33,7	—	—	—	—	—	—

Номер марки стали	Марка стали	Температура t, °C													
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100		
8	15ХФ	—	45	44,3	43,5	40,7	37,7	33,7	29,8	—	—	—	—	—	—
8а	15ХФ	—	43,1	42,3	42,1	39,7	36,4	33,5	29,8	—	—	—	—	—	—
9	30Х	47,7	46,5	44,4	42,3	38,5	35,6	31,9	28,8	26,7	26,1	26,7	28,0	28,8	28,8
9а	30Х	42,7	42,7	41,9	40,7	38,9	36,5	33,9	31,1	27,2	26,4	27,2	28,0	29,3	29,3
14	10Х2МФ (ЭИ531)	—	38,4	37,8	37,8	37,2	35,5	32,6	29,1	27,3	—	—	—	—	—
15	10Х2МБ (ЭИ454)	—	37,2	36,6	36,1	36,1	34,9	32,6	29,1	27,3	—	—	—	—	—
16	25Х2МФ (ЭИ10)	—	41,9	41,4	41,1	39,5	35,5	32,6	—	—	—	—	—	—	—
17	12Х2Н (Э1)	33,0	33,0	33,4	—	—	35,5	32,6	29,8	27,3	28,1	27,3	—	—	—
18	25Н3	37,2	37,7	38,6	38,1	36,4	34,3	31,9	28,5	26,4	25,1	26,4	27,7	28,6	28,6
19	12ХН3 (25)	37,8	—	—	—	—	31,4	—	25,6	25,6	—	—	—	—	—
20	20ХН3 (Э6)	45,4	43	39,5	—	—	36,5	—	29,1	29,1	29,1	—	—	—	—
21	30ХН3	35,2	36	36,9	36,9	36,5	35,2	33,5	29,3	26,4	26,1	26,4	27,7	28,8	28,8
21а	30ХН3	33,7	35,6	36,6	36,5	36,5	34,3	31,9	28,5	26,4	26,1	26,4	27,7	28,8	28,8
21б	30ХН3	33,5	33,9	35,1	35,6	35,6	33,5	30,6	28,0	26,7	26,7	28,8	28,6	29,3	29,3
23	35ХН3	—	36,1	37,2	36,5	36,9	35,1	31,4	28,0	—	—	27,3	—	—	—
24	20ХН4Ф (Э14)	37,7	37,7	37,7	36,9	35,4	33,5	31,2	28,8	27,6	27,1	27,1	—	—	—
25	20ХН4В (Э16)	26,2	26,2	26,2	—	—	32,6	—	—	28,5	28,5	—	—	—	—
25а	20ХН4В (Э16)	27,3	28,3	29,3	—	—	32,6	—	27,9	27,3	27,3	28,3	—	—	—
26	40Х3М	—	37,2	37,7	36,8	34,7	33,0	30,9	29,3	—	—	—	—	—	—
27	20ХЭФВМ	—	32,2	33,5	33,8	33,5	32,2	30,6	28,8	—	—	—	—	—	—
28	12Х5СМА	—	30,2	30,2	31,4	32,6	31,4	29,1	27,9	26,7	26,7	27,3	—	—	—
29	Х6М	—	36,6	—	35,1	34,2	33,5	33,5	—	—	—	—	—	—	—
30	30Г2	46,3	34,9	44,8	43,7	40,2	37,2	34,4	31,4	29,8	29,8	25,6	27,2	28,6	28,6
31	50С2Г	26,7	28,5	30,2	31,1	31,1	31,1	30,2	28,0	25,1	25,1	25,6	26,4	27,7	27,7
32	30Х1С (ЭИ179)	—	37,2	40,7	38,4	37,2	36,1	34,9	33,7	—	—	—	—	—	—

Таблица IV-21

Средняя теплоемкость низколегированных сталей c , кДж/(кг·°С), в интервале температур от 50 до $t^{\circ}\text{C}$

Марка стали	Температура, °С												
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
30X	0,494	0,507	0,523	0,536	0,565	0,586	0,624	0,703	0,687	0,678	0,674	0,669	0,669
12XН3А	—	—	—	0,528*	0,540*	0,565*	—	—	—	—	—	—	—
30Г2	0,477	0,494	0,511	0,528	0,548	0,582	0,615	0,687	0,669	0,662	0,653	0,662	0,569
50С2Г	0,502	0,511	0,528	0,544	0,565	0,595	0,628	0,695	0,687	0,678	0,678	0,678	0,678
30ХГС	—	—	0,511*	0,532*	0,548*	0,578*	—	—	—	—	—	—	—

* В интервале температур от 20 до $t^{\circ}\text{C}$.

Таблица IV-22

Теплоемкость низколегированных сталей $c_{\text{ср}}$, кДж/(кг·°С)

Интервал температур, °С	Марка стали						Интервал температур, °С	Марка стали					
	30X	30Н3	30ХН3	30Г2	50С2Г	30X		30Н3	30ХН3	30Г2	50С2Г		
50—100	0,486	0,481	0,494	0,477	0,498	0,486	700—750	1,662	0,955	1,176	1,449	0,904	
100—150	0,107	0,502	0,507	0,494	0,511	0,507	750—800	0,636	0,603	0,976	0,821	1,365	
150—200	0,523	0,523	0,523	0,511	0,523	0,523	800—850	0,653	0,624	0,569	0,557	0,611	
200—250	0,540	0,536	0,540	0,528	0,540	0,540	850—900	0,636	0,641	0,582	0,536	0,624	
250—300	0,557	0,548	0,561	0,544	0,557	0,557	900—950	0,645	0,649	0,628	0,590	0,628	
300—350	0,582	0,569	0,582	0,565	0,578	0,578	950—1000	0,636	0,649	0,636	0,599	0,636	
350—400	0,607	0,590	0,599	0,590	0,603	0,603	1000—1050	0,632	0,641	0,636	0,607	0,645	
400—450	0,636	0,619	0,632	0,615	0,632	0,632	1050—1100	0,632	0,641	0,645	0,615	0,653	
450—500	0,669	0,662	0,674	0,649	0,666	0,666	1100—1150	0,641	0,645	0,645	0,624	0,662	
500—550	0,720	0,703	0,720	0,695	0,703	0,703	1150—1200	0,641	0,649	0,653	0,632	0,669	
550—600	0,770	0,749	0,775	0,741	0,749	0,749	1200—1250	0,649	0,657	0,653	0,636	0,678	
600—650	0,825	0,791	0,812	0,779	0,783	0,783	1250—1300	0,649	0,662	0,662	0,645	0,687	
650—700	1,050	1,637	1,306	0,837	0,829	0,829							

Плотность низколегированных сталей ρ , г/см³

Марка стали	Температура, °С											
	0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
15М	7,85	7,85	7,789	7,758	7,725	7,690	7,654	7,615	—	—	—	—
12МХ	7,819	7,814	7,788	7,756	7,722	7,686	7,650	7,613	—	—	—	—
15ХМ	7,85	7,85	7,790	7,758	7,725	7,690	7,656	7,622	—	—	—	—
15ХФ	7,763	7,758	7,790	7,759	7,726	7,693	7,654	7,618	—	—	—	—
30Х	7,847	7,842	7,818	7,787	7,753	7,718	7,681	7,643	7,603	7,579	7,525	—
30НЗ	7,859	7,855	7,83	7,803	7,772	7,737	7,700	7,663	7,643	7,650	7,598	7,546
30ХНЗ	7,851	7,845	7,824	7,793	7,760	7,727	7,693	7,657	7,625	7,650	7,596	7,522
12Х5СМА	7,71	7,771	7,791	—	—	—	7,679	7,649	7,619	—	—	—
Х6М	7,75	7,75	—	7,736	7,729	7,700	7,667	7,635	7,605	—	—	—
30Г2	7,854	7,849	7,826	7,794	7,760	7,723	7,685	7,646	7,605	7,626	7,590	7,532
50С2Г	7,729	7,725	7,703	7,672	7,639	7,605	7,570	7,533	7,495	7,477	7,442	7,392

Температуропроводность низколегированных сталей α , м²/ч

Интервал температур, °С	Марка стали						Интервал температур, °С	Марка стали					
	30Х			30ХНЗ				30Х			30ХНЗ		
	30Х	30НЗ	50С2Г	30Г2	30ХНЗ	50С2Г		30Х	30НЗ	30ХНЗ	30Г2	50С2Г	
50—100	0,0440	0,0366	0,0330	0,0443	0,0330	0,0259	600—650	0,0187	0,0183	0,0190	0,0208	0,0180	
100—150	0,0425	0,0345	0,0328	0,0429	0,0284	0,0266	650—700	0,0165	0,0080	0,0110	0,0180	0,0165	
150—200	0,0396	0,0338	0,0324	0,0410	0,0266	0,0266	700—750	0,0090	0,0121	0,0115	0,0097	0,0162	
200—250	0,0378	0,0334	0,0317	0,0389	0,0266	0,0266	750—800	0,0137	0,0198	0,0220	0,0162	0,0090	
250—300	0,0360	0,0331	0,0302	0,0371	0,0263	0,0263	800—850	0,0198	0,0181	0,0194	0,0201	0,0191	
300—350	0,0335	0,0306	0,0295	0,0356	0,0252	0,0252	850—900	0,0200	0,0190	0,0200	0,0212	0,0194	
350—400	0,0310	0,0292	0,0284	0,0324	0,0245	0,0245	900—950	0,0209	0,0191	0,0205	0,0214	0,0198	
400—450	0,0284	0,0270	0,0266	0,0295	0,0234	0,0234	950—1000	0,0212	0,0192	0,0205	0,0216	0,0200	
450—500	0,0259	0,0248	0,0241	0,0274	0,0219	0,0219	1000—1050	0,0216	0,0209	0,0209	0,0219	0,0200	
500—550	0,0234	0,0223	0,0227	0,0249	0,0209	0,0209	1050—1100	0,0200	0,0212	0,0212	0,0219	0,0205	
550—600	0,0209	0,0201	0,0209	0,0223	0,0198	0,0198							

Таблица IV-25

Удельное сопротивление низколегированных сталей ρ_s , 10^6 , Ом·см

Марка стали	Температура, °С														
	0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
15ХФ	—	—	28,1	34,5	42,1	51,3	60,6	73,1	83,3	110,6	114,5	117,7	120,5	123,0	—
30Х	20,0	21,0	25,9	33,0	41,7	51,7	63,6	77,8	93,4	105,0	112,0	—	—	—	—
12ХН2	—	33,0	36,0	43,0	52,0	59,0	67,0	—	—	108,0	116,0	—	—	—	—
12ХН3	—	29,6	—	—	—	—	—	—	—	110,0	123,0	—	—	—	—
20ХН3	—	24,0	29,0	36,0	46,0	56,0	66,0	—	—	111,5	114,8	117,8	120,1	122,5	124,6
30ХН3	25,6	26,8	31,7	38,7	46,9	56,7	68,1	81,7	98,1	111,5	114,8	117,8	120,1	122,5	124,6
20ХН4Ф	—	36,0	41,0	48,0	56,0	64,0	72,0	—	—	102,0	115,0	—	—	—	—
18Х2Н4ВА	—	41,0	44,0	50,0	58,0	73,0	73,0	85,0	97,0	109,0	118,0	—	—	—	—
30Г2	19,7	20,8	25,9	33,3	42,1	52,3	64,5	78,6	94,6	110,3	114,3	117,4	120,2	122,7	125,0
12МХ	—	24,6	27,4	33,6	40,6	50,0	59,8	71,5	—	—	—	—	—	—	—
40Х3М	—	—	33,1	40,1	48,2	58,8	69,5	82,6	96,2	—	—	—	—	—	—
20Х3ФВМ	—	—	39,8	46,5	54,4	64,0	74,3	85,9	98,2	117,3	119,7	122,3	124,9	127,1	128,9
50С2Г	41,9	42,9	47,0	52,9	60,1	68,5	78,8	91,1	105,7	112,2	114,9	118,0	120,4	122,8	124,8
30Н3	25,9	27,1	32,0	39,0	47,0	56,7	67,9	81,94	99,2	112,2	114,9	118,0	120,4	122,8	124,8

Таблица IV-26

Средний коэффициент линейного расширения низколегированных сталей β 10^6 , 1°С , в интервале температур от 0 до $t^\circ\text{С}$

Марка стали	Температура, °С												
	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
15ХМ	—	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	—	—	—	—	—
30ХМА	—	12,3	12,6	—	14,5	—	14,6	—	—	—	—	—	—
15ХФ	—	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,9	—	—	—	—	—
30Х	11,8	12,2	12,8	13,3	13,7	14,1	14,5	14,8	12,1	12,6	13,7	14,4	15,1
30ХН3	10,9	11,4	12,3	12,8	13,2	13,4	13,7	13,7	10,7	12,0	13,1	14,0	14,7
Х6М	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	—	—	—	—	—	—
30Г2	11,5	11,9	12,7	13,4	13,9	14,3	14,7	15,1	12,1	12,5	13,7	14,7	15,5
15М	—	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7	—	—	—	—	—	—

Температура, °С

Марка стали	Температура, °С												
	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
12МХ	—	12,7	13,2	13,6	14,2	14,5	14,9	15,1	—	—	—	—	—
20ХМ	—	11,8	12,5	13,0	13,6	14,0	14,3	—	—	—	—	—	—
12ХМФ	—	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	—	—	—	—	—
10Х2Ф	—	12,2	12,7	13,0	13,5	13,8	14,2	14,5	—	—	—	—	—
10Х2ФТ	—	12,1	12,8	13,8	13,6	13,7	14,1	14,3	—	—	—	—	—
10Х2ФМ	—	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	—	—	—	—	—
10Х2ФВ	—	10,5	11,3	12,6	12,9	13,4	13,6	13,8	—	—	—	—	—
10Х2МФ (ЭИ531)	—	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	—	—	—	—	—
10Х2МБ (ЭИ454)	—	11,3	11,7	—	13,9	—	14,4	—	—	—	—	—	—
25Х2МФ (ЭИ10)	—	11,0	—	—	—	12,0	12,2	12,4	—	—	—	—	—
12Х5СМА	10,6	11,2	12,2	12,9	13,4	13,7	14,1	14,4	13,6	13,7	14,5	15,3	15,9
50С21													

Таблица IV-27

Термодинамические свойства некоторых низколегированных и легированных сталей

Марка стали	Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$, $1/^\circ\text{C}$, в интервале температур, °С				Теплоемкость c , кДж/(кг·°С)		Теплопроводность λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С						Критические точки, °С			
	25—100		20—400		20—600											
	25—100	20—200	20—400	20—600	100	600	100	200	300	400	500	600	Ac1	Ac3	Ar1	Ar3
40ХФ	11,0	12,0	14,5	16,5	—	—	352,3	48,7	45,4	41,9	—	—	754	790	702	746
30ХМ	12,3	(25—300) 12,5	(25—600) 13,9	(500—600) 14,4	—	—	451 (50)	—	38,4	—	—	—	757	807	693	763
35ХМ } 35Х2М }	12,3	12,5	13,9	14,4	—	—	41,5	38,7	39,5	38,4	—	—	{ 745, 715,*	820 776	620 607	— 705

Марка стали	Коэффициент линейного расширения β 10^{-6} , $1/^\circ\text{C}$, в интервале температур, $^\circ\text{C}$				Теплоемкость c , кДж/(кг \cdot °C)		Теплопроводность λ , Вт/(м \cdot °C), при температуре, $^\circ\text{C}$						Критические точки, $^\circ\text{C}$				
	25—100	20—200	20—400	20—600			100	200	300	400	500	600	A_{c_1}	A_{c_2}	A_{c_3}	A_{c_4}	
38XC 40XC	11,7	12,7	14,0	14,8	—	—	—	36,9	35,6	34,6	—	33,6	{ 760 755	860 850	—	—	—
	11,5	12,6	14,1	14,6	—	—	—	45,3	42,8	41,0	—	36,4	{ 750 750	860 830	—	—	—
25CG 35CG	11,3	11,7	13,9	14,3	—	—	—	41,8	41,0	40,8	—	40,7	755	835	600	—	—
	12,2	12,2	13,8	14,4	0,657 (380)	0,645 (424)	—	50,3	48,6	46,0	—	41,9	730	820	660	—	—
35XMФ 25Н, 30Н	11,8	13,0	14,7	15,6	0,486 (70)	0,515 (280)	0,775 (535)	—	—	—	—	18,0	710	820	660	—	—
	(100)	(200)	(400)	(600)	0,465 (70)	0,735 (535)	—	—	—	—	—	20,9 (750)	700	810	—	—	—
12X2H4 18X1HB 14,5 25X1HB	14,5	14,5	14,3	14,2	0,511 (45)	0,788 (525)	—	—	—	—	—	25,6 (910)	700	720	—	—	—
	10,7	13,1	14,6	13,2	—	—	—	—	—	—	—	23,0 (950)	700	720	—	—	—
ШХ9	13	13,9	15	15,2	—	—	—	—	—	—	—	—	730— 750	875— 890	710— 690	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ШХ15	14	15,1	15,6	15,8	0,511 (45)	0,786 (525)	—	—	—	—	—	—	727	900	694	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
X9C2 (CX8) 4X10C2M (ЭИ107)	11,1	12,7	14,3	14,2	0,473 (40)	0,490 (280)	0,913 (570)	—	—	—	—	18,4 (255)	900	970	810	870	—
	10,0 (20—100)	11,0 (20—800)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20,9 (560)	—	850	700	845	—

Примечание. В скобках приведены интервалы температур, $^\circ\text{C}$.

Таблица IV-28

Теплофизические свойства некоторых легированных конструкционных сталей

Марка стали	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент линейного расширения, $\beta \cdot 10^4$, 1/°C, в интервале температуры, °C								Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C), при температуре, °C						Критические точки, °C																
		20—100		20—200		20—300		20—400		20—500		20—600		20—700		20	100	200	300	400	500	600	A_{C1}	A_{C2}	A_{C3}	A_{C4}						
		11—54	12—18	12—36	12—89	13—15	13—36	13—53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
12Х2ФБ	7,815	11—54	12—18	12—36	12—89	13—15	13—36	13—53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
38ХА и 40Х	7,82*	11,0*	12,0*	12,2*	12,9*	13,5*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
35ХМ	7,82	12,3	12,6	—	13,9	—	14,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
35ХМФА	7,84	11,8	12,5	12,7	13,0	—	13,4	13,7	14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
P2	7,82	10,90*	12,00*	12,70*	13,65*	13,72*	13,82*	14,00*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
ЭИ723	—	12,5	12,9	12,3	18,7	14,0	14,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
ЭИ415	7,79	—	—	—	12,3— 12,6 (20— 450)	12,75— 12,84 (2—550)	13,82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
21Н5	7,84	10,9*	11,8*	—	12,45*	—	12,45*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
40Н	7,84	—	11,7*	12,36*	12,9*	—	12,9*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
40ХН	7,82	11,8	12,3	13,4	14,0	—	13,52*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
34ХНЗМ	7,83	10,8	11,6	13,3	13,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35ХНЗМФ	7,83	11,8	12,1	12,6	13,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50ХФА	7,8	11,3*	12,4*	—	12,9*	—	14,4	13,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60С2	7,68	(11—5— 12,4*)	12,8	—	(13,1— 13,9*)	—	13,4	13,6— 14,5*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38ХМЮА	7,71	12,27*	13,14*	13,31*	13,49*	—	13,50*	13,81*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* В интервале исследования от 25°C.

3. Хромистые нержавеющие стали

Таблица IV-29

Химический состав исследованных хромистых нержавеющих сталей*

Номер марки стали	Марка стали	Содержание, %							Режим термической обработки	Температурный интервал исследования, °С	Характеристики свойств, приведенных в последующих таблицах	
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V				W
1	1X13 (ЭЖ1)	0,11	0,36	0,33	13,6	—	—	—	—	—	20—900	β , λ , ρ_s
1a	1X13 (ЭЖ1)	0,13	0,25	0,17	12,95	—	0,14	0,012	—	—	0—1200	ρ , β , σ , λ , ρ_s
2	2X13 (ЭЖ2)	0,17	0,40	0,35	13,2	—	—	—	—	—	20—900	λ , ρ_s , β
3	3X13 (ЭЖ3)	0,26	0,38	0,28	12,8	—	$\leq 0,6$	—	—	—	20—900	ρ , β , λ , ρ_s
3a	3X13 (ЭЖ3)	0,27	0,28	0,18	13,69	0,01	0,20	0,022	0,25	—	0—1200	ρ , β , λ , ρ_s , σ
4	4X13 (ЭЖ4)	0,36	0,51	0,52	13,29	—	$\leq 0,6$	—	—	—	20—900	ρ , β , λ , ρ_s
5	X17 (ЭЖ17)	$\leq 0,12$	$\leq 0,7$	$\leq 0,9$	16—18	—	$\leq 0,6$	—	—	—	20—700	ρ , β , λ
6	X28 (ЭЖ27)	$\leq 0,20$	$\leq 0,8$	$\leq 1,2$	26—28	—	$\leq 0,6$	—	—	0,31 Ti	20—1000	ρ , β , λ

* Марка обозначена не по ГОСТу, а по химическому составу стали.

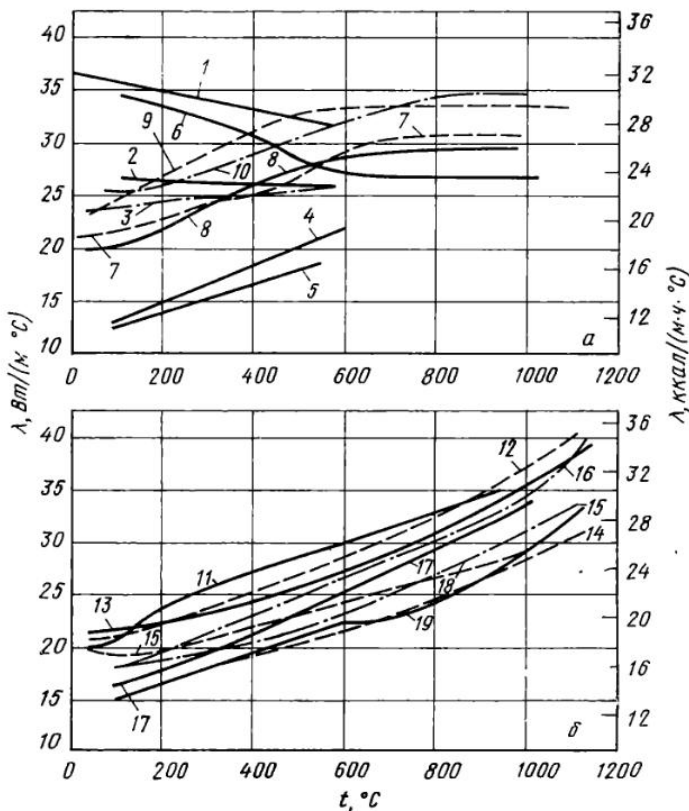


Рис. 24. Зависимость коэффициентов теплопроводности λ хромистых и хромоникелевых сталей от температуры t

Состав исследованных металлов

Кривая на рис. 24	Марка стали	Содержание, %					
		C	Si	Mn	Ni	Cr	прочие
1	10X5	0,10	0,18	0,45	—	5,15	—
2	08X15	0,08	0,20	0,35	0,05	15,19	—
3	41X15H	0,14	0,12	0,19	0,70	14,60	—
4	X20H80	—	—	—	80,0	20,0	—
5	X16H61	—	—	—	61,0	16,0	23 Fe
6	X5	0,01	0,02	0,04	—	4,96	—
7	44X9C4ГФ	0,44	3,36	0,85	—	8,82	0,2 V
8	41X2C4	0,41	4,33	0,33	—	2,05	—
9	39X2C3	0,39	3,36	0,48	—	2,05	—
10	45X3C4K	0,45	3,62	0,36	—	2,91	1,40 Co
11	07X20K26	0,07	0,51	0,42	—	20,47	26,0 Co
12	15X30H2CG	0,15	0,84	0,80	1,73	27,93	—
13	19X25H4C	0,19	0,50	0,51	4,22	24,5	—
14	12X23H20C3Г2	0,12	2,38	1,4	20,30	22,75	—
15	48X13H12B3CG	0,48	1,22	1,44	12,33	12,85	2,88 W
16	53X13H12B10CG	0,53	1,07	1,17	11,90	13,34	9,92 W
17	12X17H63Г	0,12	0,51	1,0	62,85	16,95	—
18	09X13H83CG	0,09	0,75	0,88	82,25	12,98	—
19	04X20H75CG	0,04	1,13	0,81	75,15	19,93	Ос-тальное Fe

Примечание. Марки стали обозначены по химическому составу.

Таблица IV-30

Критические точки фазовых превращений сталей X13, 2X13, 3X13 и 4X13, °C

Марка стали	A_{C1}	A_{C2}	A_{C1}	A_{C3}	Марка стали	A_{C1}	A_{C2}	A_{C3}	A_{r1}	A_{r2}
X13	820	855	750	780	3X13	800	835	835	710	770
2X13	825	870	750	795	4X13	800	835	835	700	765

Таблица IV-31

Коэффициент теплопроводности хромистых нержавеющей сталей λ , Вт/(м·°C), при различной температуре

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °C												
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
1а	X13	26,7	27,7	27,7	28,0	27,7	27,2	26,4	25,5	25,1	26,7	27,7	28,8	30,5
1б	X13	27,3	32,7	26,4	26,1	26,1	26,3	26,7	27,2	—	—	—	—	—
2	2X13	24,3	25,5	25,8	26,3	26,4	26,6	26,4	26,2	26,7	27,6	—	—	—
2б	2X13	20,5	22,1	23,6	24,7	25,6	26,2	26,7	27,3	27,9	28,5	—	—	—
3а	3X13	25,1	26,4	27,2	27,7	27,7	27,2	26,7	25,6	25,1	26,7	27,7	28,8	30,1
3б	3X13	—	25,1	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	24,7	—	—	—	—	—
4	4X13	28,8	28,0	29,1	29,3	29,2	28,8	28,4	28,0	—	—	—	—	—
5	X17	—	24,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	X28	—	20,9	21,7	22,7	22,7	23,4	24,3	25,00	—	—	—	—	—

Таблица IV-32

Средняя теплоемкость хромистых нержавеющих сталей $c_{ср}$, кДж/(кг·°C), в интервале температур от 50 до t°С (рис. 25)

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °C												
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
1а	1X13	0,469	0,498	0,515	0,536	0,535	0,599	0,636	0,657	0,666	0,666	0,666	0,662	0,662
2а	2X13*	—	—	0,511	0,532	0,548	0,574	—	—	—	—	—	—	—
3а	3X13	0,469	0,498	0,511	0,532	0,561	0,595	0,641	0,674	0,691	0,682	0,682	0,678	0,678

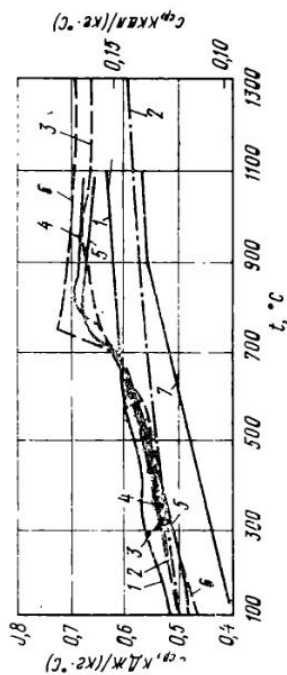
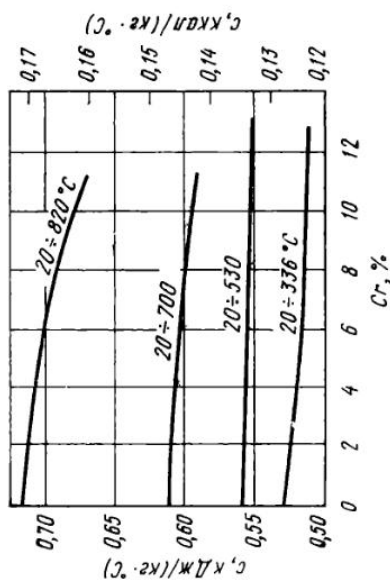
* Значения $c_{ср}$ в интервале температур от 20 до t°С.Рис. 25. Зависимость средней теплоемкости $c_{ср}$ сталей от температуры: 1 — 1X13; 2 — хромоникелевая аустенитная; 3 — армо-железо; 4 — 50Cr21; 5 — 30Г2; 6 — углеродистая (1,2% C); 7 — P18Рис. 26. Зависимость удельной теплоемкости c хромистых сталей от содержания хрома

Таблица IV-33

Плотность хромистых нержавеющей сталей ρ , г/см³

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °С												
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1	X13	7,724	7,719	7,700	7,663	7,644	7,612	7,583	7,553	7,520	7,485	—	—	—
1а	X13	7,677	7,672	7,654	7,626	7,598	7,569	7,539	7,492	7,476	7,445	—	—	—
2	2X13	7,674	7,669	7,651	7,623	7,595	7,566	7,535	7,491	7,473	7,440	—	—	—
3	3X13	7,652	7,648	7,630	7,602	7,573	7,544	7,512	7,483	7,450	7,442	—	—	—
3а	3X13	7,749	7,745	7,725	7,700	7,671	7,642	7,611	7,580	7,548	7,515	—	—	—
4	4X13	7,745	7,741	7,722	7,696	7,667	7,638	7,608	7,575	7,542	7,519	7,523	7,477	7,425
5	X17	7,720	7,700	—	—	—	—	7,590	7,570	7,540	7,500	7,524	7,463	7,397
6	X28	7,650	7,630	—	—	—	—	7,520	7,490	7,460	7,430	—	—	—

Таблица IV-34

Удельное электросопротивление хромистых нержавеющей сталей $\rho_{20} \cdot 10^6$, Ом·см, при различной температуре

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °С														
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
1а	X13	48,6	50,6	58,4	67,9	76,9	85,4	93,8	102,1	110,3	116,0	115,0	117,0	119,0	121,6	125,3
2	2X13	—	58,8	65,3	73,0	80,0	88,4	95,2	102,2	110,2	114,1	—	—	—	—	—
3а	3X13	50,3	52,2	59,5	68,4	76,9	85,8	93,5	101,5	109,9	115,7	114,6	117,9	120,9	122,9	125,0
4	4X13	—	59,1	64,6	71,4	78,8	86,4	94,0	100,5	108,0	—	—	—	—	—	—

Таблица IV-35

Термодинамические свойства некоторых нержавеющих, жаростойких и жаропрочных сталей

Марка стали	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент линейного расширения β 10 ⁻⁶ , 1/°С, при температуре, °С								Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С																	
		20—100	20—200	20—300	20—400	20—500	20—600	20—700	20—800	100	200	300	400	500	600	700	800										
		4Х13	7,68	10,3*	10,7	—	11,5*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27,6	28,8	29,3	28,8	28,5	28,0	—	—
1Х11МФ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(15Х11МФ)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1Х12ВНМФ	7,85	—	10,5*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(ЭИ802)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1Х12В2МФ	7,83	10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(ЭИ756)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1Х14Н18В2Б	8,1	16,7	17,5	17,5	18,15	18,28	18,3	18,3	18,6	20,1	15,5	17,2	18,4	20,1	21,7	23,0	24,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(ЭИ695)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Х23Н18	7,88	—	—	—	16,3	16,4	16,85	17,85	17,85	—	15,9	13,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(ЭИ417)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭИ123	7,87	—	16,1	16,7	17,2	17,4	17,8	18,2	18,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭХ19Н9МВБТ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(ЭИ572)	7,96	—	—	—	16,02	16,37	16,75	16,97	16,97	17,94	15,1	16,3	18,4	20,1	21,7	23,4	25,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭИ400	7,97	14,8	16,1	16,7	17,2	17,6	17,9	18,2	18,2	—	19,7	20,5	21,3	23,0	24,3	25,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭИ403	7,93	—	—	—	17,6	17,8	18,2	18,7	18,7	—	19,7	20,5	21,3	23,0	24,3	25,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭИ405	7,96	—	—	—	17,1*	17,4*	17,8*	18,2*	18,2*	18,6*	15,5	17,2	18,4	20,1	21,7	23,0	24,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Марка стали	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент линейного расширения β_{100} , 1/°С, при температуре, °С										Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С													
		20—100		20—200		20—300		20—400		20—500		20—600		20—700		20—800		100	200	300	400	500	600	700	800
		20—100	20—200	20—300	20—400	20—500	20—600	20—700	20—800	100	200	300	400	500	600	700	800								
ЭИ395	8,07	15,1	15,3	15,3	15,6— 16,2	15,7— 16,6	16,1— 16,9	17,1	—	10,1	11,7	14,2	17,2	20,9	25,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭИ424	7,94	—	—	—	16,1	16,7	16,9	17,5	—	14,2	15,9	17,2	18,8	20,1	21,7	23,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ХН35ВТ (ЭИ612)	8,164	—	—	15,15— 16,05*	15,46— 16,40*	15,61— 16,50*	16,13— 17,00*	16,62— 17,35* 17,7 (25—750)	—	13,4	15,5	17,2	18,8	20,5	22,2	23,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ХН10К (ЭИ434)	8,20	—	—	—	15,55— 17,5	16,4— 17,5	16,6— 17,6	17,2— 17,7	17,4	13,4	15,1	17,2	18,8	20,5	22,2	23,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4Х15Н7Г1Ф2МС (ЭИ388)	7,79	—	—	—	17,5	17,8	18,3	18,5	—	—	24,7	28,5	30,9	34,3	38,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ХН80Т (ЭИ437)	8,2	—	—	—	12,6	13,3	13,9	14,6	—	—	13,8	—	16,7	18,4	20,9	23,4	25,6	—	—	—	—	—	—	—	—
ХН80БЮ (ЭИ607)	8,3	—	—	13,1*	14,0*	14,45*	14,9*	15,6*	16,35*	13,4	15,5	18,0	20,0	22,2	24,3	26,4	28,8	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. В скобках приведены интервалы температур, °С.

* В интервале температур от 25°С.

4. Хромоникелевые аустенитные стали

Таблица IV-36

Химический состав исследованных хромоникелевых аустенитных сталей

Номер марки стали	Марка стали	Содержание, %							Характеристики, приведенные в последующих таблицах	Температура интервала исследования, °С
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Другие элементы		
1	X18H9 (ЭЯ1)	0,14	2,0	0,8	17—20	—	8—11	—	ρ, β	0—400
1a	X18H9	0,08—0,20	2,0	1,0	17—19	—	8—10	—	β, λ	0—1000
16	X18H9*	0,15	0,26	0,9	17—20	—	8—10	—	λ, ρ _э	20—800
1b	X18H9*	0,08	2,0	1,0	18—20	—	8—10	—	β, λ	0—1000
2	2X18H9 (ЭЯ2)	0,15—0,20	0,3—0,7	0,8	17—19	—	8—9,5	—	λ, ρ _э	20—900
3	1X18H9T (ЭЯ1Т)	0,09	0,88	0,74	18,1	—	9,82	Ti 0,45	β, λ, ρ _э	20—900
3a	1X8H9T	0,14	0,7	1,2	17—20	—	8—11	Ti 0,5	ρ, β, λ	0—900
3б	1X18H8T	0,14	0,57	0,8	17,5	—	8,75	Ti 0,78	λ, ρ _э	20—700
3в	1X18H9T	0,08	2,0	1,0	17—19	—	8—11	Ti < 0,4	β, λ	0—1000
4	X18H9B*	0,08	0,37	0,68	19,1	—	8—14	W 0,60	ρ, β, c, λ, ρ _э	0—1200
5	X18H9M*	0,15	2,0	1,0	17—19	0,60	8—10	—	β, λ	0—1000
6	X18H9C2*	0,08—0,20	2,0	2,0—3,0	17—19	—	8—10	—	β, λ	0—1000
7	0X18H12B (ЭИ398, ЭИ402)	0,08	2,0	1,0	17—19	—	9—12	Nb ≤ 0,8	β, λ	0—1000
7a	X18H11B*	0,1	0,8	0,3	19,0	—	14,0	Nb 1,7	λ, ρ _э	20—800
8	4X14H14B2M (ЭИ69)	0,47	0,47	0,68	13,6	0,54	14,5	W 2,24	λ, ρ _э	20—700
9	1X14H14B2M (ЭИ257)	0,10	0,43	0,59	15,3	0,72	12,3	W 2,76	ρ, β, λ, ρ _э	20—900
9a	1X14H14B2M (ЭИ257)	0,10	0,43	0,59	15,3	0,72	12,3	W 2,76	ρ, ρ, λ, ρ _э	20—900
10	1X14H18M3T	0,10	0,5	0,6	14,0	3,5	18	Ti 0,75	λ, ρ	20—800
11	X18H12	0,12	2,0	1,0	17—19	—	10—13	—	β, λ	0—1000
12	X2H11*	0,08	2,0	1,0	19—21	—	10—12	—	β, λ	0—1000
13	X23H13 (ЭИ319)	0,20	2,0	1,0	22—25	—	12—45	—	ρ, β, λ	0—1000
13a	X23H13 (ЭИ319)	0,20	2,0	1,0	22—24	—	12—15	—	β, λ	0—1000
14	2X25H20	0,25	2,0	1,5	24—26	—	19—22	—	β, λ	0—1000
15	X18H25C2 (ЭЯ3С)	0,3—0,35	0,7	2—3	16—20	—	23—26	—	ρ, β, λ	10—700
15a	X18H25C2 (ЭЯ3С)	0,42	0,63	2,79	18,0	—	21,5	—	λ, ρ _э	20—900
16	X20H14C2 (ЭИ211)	0,20	0,7—1,2	2—3	19—22	—	13—15	—	ρ, β, λ	0—1000
17	X25H20C2 (ЭИ283)	0,20	0,2—0,7	2—3	24—27	—	18—21	W 2,5	ρ, β, λ	0—1000
18	X13H25M2B2	0,4	0,8	1,5	13,0	2,0	25,0	—	λ, ρ _э	20—800
19	X7H25 (ЭИ25)	0,45	0,38	0,33	7,12	—	25	—	λ, ρ _э	20—900
20	X2H35 (ЭИ36)	0,12	0,35	0,14	1,8	—	35	—	λ, ρ _э	20—900
21	H28	0,28	0,89	0,15	Следы	—	28,37	—	ρ, β, c, λ, ρ _э	0—1200

Примечание. Режим термической обработки для стали марки X18H9B — аустенитизация при 1100°С, для стали марки 1X14H14B2M (ЭИ257) — аустенитизация при 1150°С (9a) или стабилизация при 800°С, 10 ч. (9).

* Марка обозначена не по ГОСТу, а по химическому составу стали.

Теплопроводность хромоникелевых аустенитных сталей λ , Вт/(м·°С)

Условный номер марки стали	Марка	Температура, °С													
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
		1а	X18H9 (ЭН1)	—	—	16,3	17,9	18,8	20,1	21,5	—	—	—	—	—
1б	X18H9	—	—	16,3	17,6	18,8	20,5	21,7	23,4	24,7	26,9	—	—	—	—
2	2X18H9 (ЭН2)	—	17,6	18,7	19,9	21,1	22,2	23,4	24,5	25,8	26,9	28,1	—	—	—
3	1X18H9T (ЭН1Т)	—	—	16,0	17,6	19,2	20,8	22,3	23,8	25,5	27,6	—	—	—	—
3а	1X18H9T (ЭН1Т)	—	—	16,2	—	19,1	21,1	22,1	23,7	—	25,2	26,9	—	—	—
3б	1X18H9T (ЭН1Т)	13,1	—	15,6	17,6	19,4	21,1	22,3	23,6	24,8	—	—	—	—	—
3в	1X18H9T (ЭН1Т)	—	—	16,0	17,7	19,2	20,6	22,1	—	—	—	—	—	—	—
4	X18H98	15,9	—	16,3	17,2	18,4	20,1	21,7	23,8	25,6	26,7	26,7	28,0	28,8	29,7
5	X18H9M	—	—	16,3	—	—	—	21,5	—	—	—	—	—	—	—
6	X18H8C2	—	—	15,9	—	—	—	21,6	—	—	—	—	—	—	—
7	X18H118 (ЭИ398, ЭИ402)	—	—	16,0	17,7	19,2	20,6	22,1	—	—	—	—	—	—	—
7а	X18H116	—	—	15,0	16,7	18,4	20,1	21,7	23,5	25,1	26,7	—	—	—	—
8	4X14H14B2M (ЭИ69)	13,8	—	15,5	16,9	19,2	20,2	21,2	21,9	—	—	—	—	—	—
9	1X14H14B2M (ЭИ257)	—	—	15,6	17,1	18,7	20,1	21,6	22,9	24,3	25,9	26,9	—	—	—
9а	1X14H14B2M (ЭИ257)	—	14,8	15,4	16,0	17,1	18,1	19,9	21,5	23,4	25,6	26,9	—	—	—
10	1X14H18M3T	—	—	14,2	15,9	18,0	19,7	21,4	22,6	24,2	25,9	27,2	—	—	—
11	X18H112	—	—	16,3	—	—	—	21,5	—	—	—	—	—	—	—
12	X20H11	—	—	15,2	—	—	—	21,6	—	—	—	—	—	—	—
13	X23H13 (ЭИ319)	—	—	13,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13а	X23H13 (ЭИ319)	—	—	13,8	—	—	—	18,7	—	—	—	—	—	—	—
14	2X25H20	—	—	13,8	14,2	15,2	16,5	18,7	—	—	—	—	—	—	—
15	X18H2502 (ЭЯ3С)	—	—	15,1	—	—	—	22,7	24,7	26,2	(27,9)	—	—	—	—
15а	X18H25C2 (ЭЯ3С)	—	—	17,4	19,2	—	—	26,7	28,8	30,8	30,8	—	—	—	—
16	X20H14C2 (ЭИ211)	—	—	13,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	X25H20C2 (ЭИ283)	—	—	14,7	—	—	—	21,6	23,5	25,1	26,9	28,8	—	—	—
18	X13H25M2	—	—	11,7	13,4	15,0	17,2	19,3	21,7	23,8	26,7	—	—	—	—
19	X17H25 (ЭН25)	—	—	16,3	17,1	17,4	18,1	18,8	—	—	—	—	—	—	—
20	XH2H35 (ЭН36)	—	—	16,0	17,2	17,9	18,4	18,9	19,5	20,0	20,7	—	—	—	—
21	H28	12,6	—	14,7	16,4	17,6	18,8	20,5	22,2	23,5	25,1	26,4	27,6	28,4	29,8

Таблица IV-38

Средняя теплоемкость хромоникелевых аустенитных сталей $c_{ср}$, кДж/(кг·°С), в интервале температур от 50 до $t^{\circ}\text{C}$

Номер марки стали	Марка	Температура, °С							
		100	150	200	250	300	350	400	450
4 21 8а	X18H9B H28 ЭИ69*	0,511	0,519	0,523	0,528	0,532	0,536	0,540	0,544
		0,502	0,507	0,511	0,519	0,523	0,528	0,528	0,532
		—	—	—	—	0,507	—	0,511	—

Продолжение табл. IV-38

Номер марки стали	Марка	Температура, °С							
		500	550	600	650	700	750	800	850
4 21 8а	X18H9B H28 ЭИ69*	0,553	0,561	0,569	0,574	0,578	0,582	0,586	0,590
		0,536	0,540	0,544	0,548	0,548	0,553	0,557	0,557
		0,523	—	0,528	—	—	—	—	—

Продолжение табл. IV-37

Номер марки стали	Марка	Температура, °С								
		900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
4 21 8а	X18H9B H28 ЭИ69*	0,595	0,595	0,599	0,595	0,603	0,607	0,607	0,611	0,615
		0,561	0,599	0,561	0,565	0,565	0,569	0,569	0,574	0,578
		—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Значения $c_{ср}$ даны для интервала температур от 20 до $t^{\circ}\text{C}$.

Таблица IV-39

Теплоемкость хромоникелевых сталей c , кДж/(кг·°С)

Номер марки стали	Марка стали	Интервал температур, °С							
		50—100	100—150	150—200	200—250	250—300	300—350	350—400	400—450
4 21	X18H9B H28	0,511	0,528	0,532	0,540	0,548	0,561	0,569	0,582
		0,502	0,511	0,519	0,536	0,544	0,561	0,540	0,548

Номер марки стали	Марка стали	Интервал температур, °C							
		450—500	500—550	550—600	600—650	650—700	700—750	750—800	800—850
4 21	X18H9B H28	0,595	0,628	0,649	0,632	0,624	0,628	0,641	0,649
		0,565	0,578	0,586	0,590	0,586	0,586	0,586	0,586

Номер марки стали	Марка стали	Интервал температур, °C								
		850—900	900—950	950—1000	1000—1050	1050—1100	1100—1150	1150—1200	1200—1250	1250—1300
4 21	X18H9B H28	0,641	0,649	0,649	0,653	0,662	0,666	0,674	0,678	0,682
		0,590	0,595	0,599	0,599	0,603	0,611	0,624	0,641	0,662

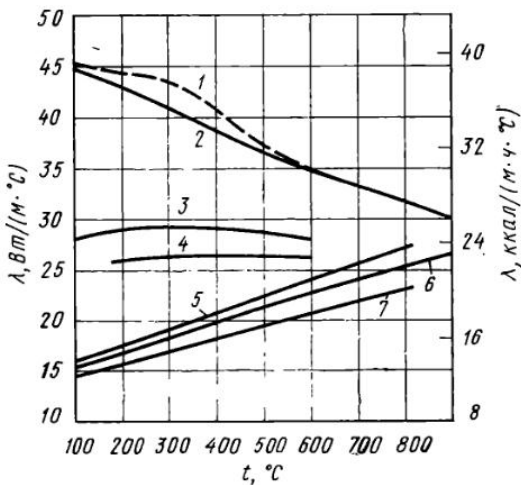


Рис. 27. Зависимость коэффициента теплопроводности λ легированных сталей от температуры t :
 1 — 15ХФ; 2 — 12МХ; 3 — 4Х13; 4 — 2Х13; 5 — ЭЯ1Т;
 6 — ЭИ257; 7 — Г21Х15

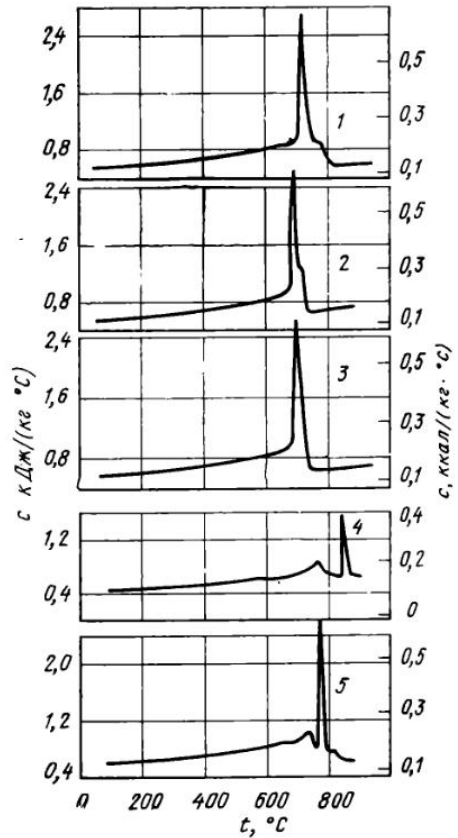


Рис. 28. Зависимость истинной теплоемкости c легированных сталей от температуры:
 1 — сталь 30Г2; 2 — 25Н3; 3 — 30ХН3;
 4 — Р18; 5 — 50С2Г

Удельное электросопротивление хромоникелевых аустенитных сталей $\rho_3 \cdot 10^6, \text{ Ом}\cdot\text{см}$

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °C														
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
16	X18H9	—	—	74,3	81,9	89,1	95,1	100,1	104,8	109,4	114,0	—	—	—	—	—
2	2X18H9 (ЭЯ2)	—	72,0	73,5	85,5	92,5	97,5	103,0	108,0	111,5	115	118,5	—	—	—	—
3	1X18H9T (ЭЯ1T)	—	72,3	79,2	85,1	91,2	97,1	101,5	106,5	109,2	113,0	—	—	—	—	—
3a	1X18H9T (ЭЯ1T)	—	75	80,5	87,5	94,0	99,5	105,0	109,5	114,0	—	—	—	—	—	—
4	X18H9B	69,4	71,0	77,6	85,0	91,6	97,6	102,6	107,2	111,1	114,1	117,1	119,5	122,0	124,1	125,7
7a	X18H11B	—	—	84,6	91,6	97,6	103,4	107,8	111,6	115,0	117,8	—	—	—	—	—
8	4X14H14B2M (ЭЯ69)	—	81,5	87,5	94,5	100	105,5	110	114	117,5	—	—	—	—	—	—
9	1X14H14B2M (ЭЯ257)	—	—	82,4	88,9	95,6	100,2	104,5	108,5	112,0	115,5	119,2	—	—	—	—
9a	1X14H14B2M (ЭЯ257)	—	83,1	86,8	94,3	100,5	105,6	109,8	114,2	117,5	120,5	123,5	—	—	—	—
10	1X14H18M3T	—	—	89	95	100	104	107,5	111	115	124	—	—	—	—	—
15a	X18H25C2 (ЭЯ3С)	—	—	98,5	103	105,5	107,5	110	114	117,5	—	—	—	—	—	—
18	X13H25M2B2	—	—	103,0	108,0	112,1	115,3	118,1	119	121	123	—	—	—	—	—
19	X7H25 (ЭЯ25)	—	—	—	—	109	112	115	118	121	124	127	—	—	—	—
20	X2H35 (ЭЯ36)	—	87,5	92,5	98,5	103	107	110	113,5	116	118,5	120,5	—	—	—	—
21	H28	82,9	84,2	89,1	94,7	99,6	103,9	107,7	111,2	114,2	116,5	118,4	120,6	122,5	124,3	125,7

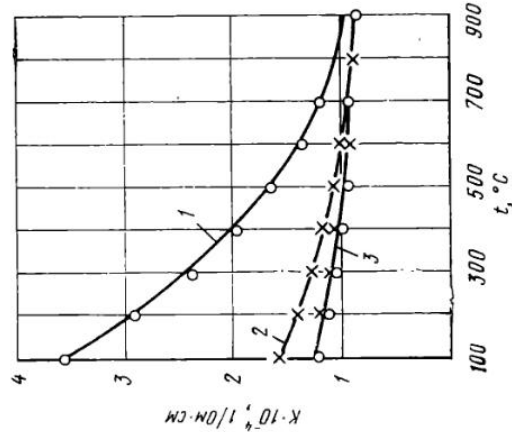


Рис. 29. Зависимость удельной электросопротивленности ρ_3 легированных сталей от температуры t :
 1 — 12МХ; О — 15ХФ; 2 — 2Х13 и Х — 4Х13;
 3 — ЭЯ1Т; О — ЭЯ257; ХГ21Х15

Таблица IV-41

Средний коэффициент линейного расширения хромоникелевых аустенитных сталей β_{10}° , 1°C в интервалах температур от 20 до t° , C

Номер марки стали	Марка стали	Температура, $^{\circ}\text{C}$													
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200		
1	X18H9 (ЭЯ1)	16	16	17,5	18,1	18,3	18,5	18,8	19,3	19,4	19,5	19,6	—	—	—
1а	X18H9 (ЭЯ1)	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	19,4	19,4	19,5	19,6	—	—	—
1б	X18H9	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	19,4	19,4	19,5	19,6	—	—	—
3	IX18H9T (ЭЯ1Т)	15,1	17,0	17,8	18,3	18,5	18,8	19,1	19,3	19,3	19,3	19,3	—	—	—
3а	IX18H9T (ЭЯ1Т)	16,6	17,0	17,2	17,5	17,9	18,2	18,6	19,0	19,0	19,4	19,6	—	—	—
3в	IX18H9T (ЭЯ1Т)	16,7	16,9	17,1	17,6	18,3	18,9	19,6	19,0	19,0	19,4	19,6	—	—	—
4	IX19H8B	14,8	16,5	17,1	17,6	18,0	18,4	18,8	19,0	19,0	19,4	19,6	—	—	—
5	X18H9M	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	19,0	19,0	19,4	19,6	—	—	—
6	X18H9C2	16,2	17,1	17,9	18,6	19,2	19,9	20,5	19,9	19,9	19,9	19,9	—	—	—
7	X18H11B	16,7	16,9	17,1	17,7	18,3	18,8	19,3	19,9	19,9	19,9	19,9	—	—	—
9	IX14H14B2M	16,1	17,3	17,8	18,1	18,4	18,8	19,1	19,3	19,3	19,3	19,3	—	—	—
9а	(ЭИ257) IX14H14B2M	17,0	17,8	18,3	18,8	19,0	19,2	19,4	19,9	19,9	19,9	19,9	—	—	—
11	(ЭИ257)	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	19,0	19,0	19,0	19,0	—	—	—
12	X18H12	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	19,0	19,0	19,0	19,0	—	—	—
12	X20H11	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	19,0	19,0	19,0	19,0	—	—	—
13	X23H13 (ЭИ319)	15,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13а	X23H13 (ЭИ319)	14,9	15,7	16,6	17,1	17,5	17,8	18,2	19,2	19,2	19,2	19,2	—	—	—
14	2X25H20	14,4	15,2	16,1	16,5	16,8	17,2	17,6	18,5	18,5	18,5	18,5	—	—	—
15	X18H25C2 (ЭЯ3С)	16,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	X20H14C2 (ЭИ211)	16,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	X25H20C2 (ЭИ283)	16,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	H28	13,7	15,3	16,3	17,0	17,5	17,8	18,1	18,3	18,6	18,8	19,1	19,1	19,1	19,4

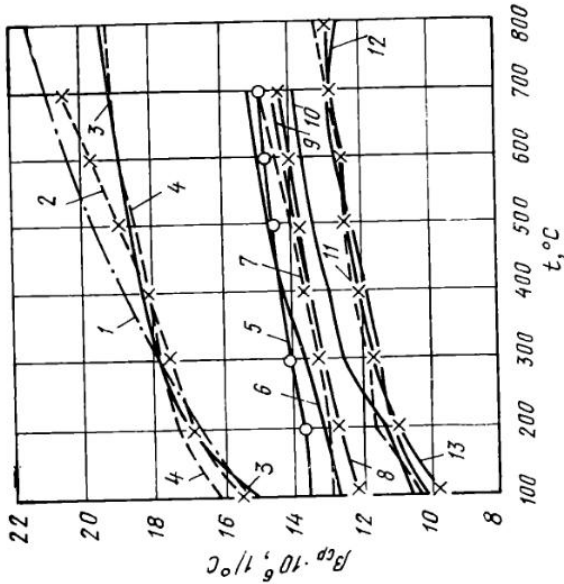


Рис. 31. Значения средних коэффициентов линейного расширения легированных сталей β_{cp} в интервале температур от 20 до $t^{\circ}C$:
 1 — Г21Х15; 2 — Г20Х12; 3 — ЭИ1Т; 4 — ЭИ257; 5 — 10Х2М;
 6 — 12МХ; 7 — 15ХФ; 8 — 10Х2Ф; 9 — 10Х2ФГ; 10 — 10Х2ФВ;
 11 — Х13; 12 — 2Х13; 13 — 4Х13

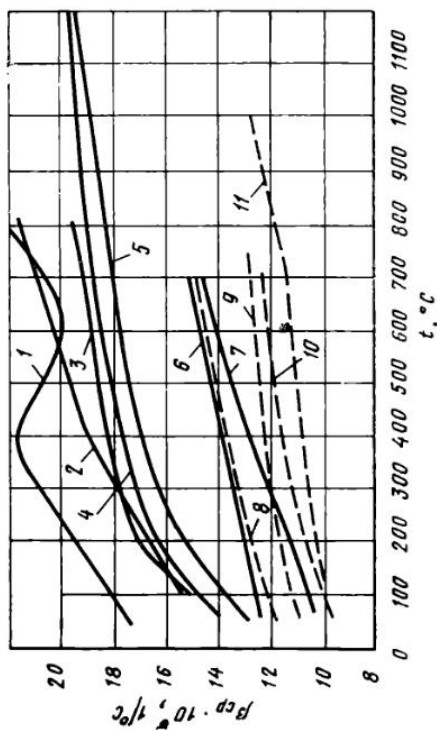


Рис. 30. Зависимость средних коэффициентов линейного расширения β_{cp} сталей от температуры t :
 1 — Г13; 2 — Г21Х15Т; 3 — Х18Н9Т; 4 — Х18Н8В; 5 — Н28; 6 — углеродистая с 0,6% С; 7 — то же, 1,2% С; 8 — 30ХН3; 9 — Р18; 10 — 3Х13; 11 — Х28

5. Высоколегированные стали

Таблица IV-42
Химический состав высоколегированных сталей с особыми свойствами*

Номер марки стали	Марка стали	Содержание, %										Режим термической обработки	Характеристики, приведенные в последующих таблицах	Температурный интервал исследования, °С				
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Ti	V	W	Co				Nb			
1	Г13	1,22	13,0	0,22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Нагрев до 1050 °С, охлаждение на воздухе	ρ , β , σ , λ , ρ_{β}	0—1200
2	Г20Х12Ф*	0,26	18,0	0,83	12,05	—	—	—	0,51	—	—	—	—	—	—	Стабилизация при 800 °С 10 ч	ρ , β , λ , ρ_{β}	20—900
3	Г21Х15Т*	0,05	20,88	0,66	14,66	—	—	—	—	0,25	—	—	—	—	—	То же	ρ , β , λ , ρ_{β}	20—900
4	Х13Н13К10*	0,4	0,8	1,0	13,0	2,0	13,0	—	—	—	—	—	2,5	10	3,0	—	λ , ρ_{β}	20—800
5	Х19Н10К47*	0,27	0,77	0,52	19,1	2,2	10,5	—	3,0	—	—	—	—	46,6	1,0	—	λ , ρ_{β}	20—800
6	Р18	0,715	0,25	0,30	4,26	Следы	0,07	—	1,1	—	—	—	18,45	—	—	Отжиг, 830 °С	ρ , β , σ , λ , ρ_{β}	20—1200
7	ЭР	0,66—0,28	0,40	0,40	3,8—4,6	—	0,20	—	0,5—0,8	17—18,5	—	—	—	—	—	Исходное состояние	λ , ρ_{β}	20—900
7а	ЭР	0,66—0,28	0,40	0,40	3,8—4,6	—	0,20	—	0,5—0,8	17—18,5	—	—	—	—	—	Нормализация	λ , ρ_{β}	20—900
8	ЭХ12	2—2,3	0,35	0,5	11,5—13,0	—	—	—	—	—	—	—	0,5—1,0	—	—	—	λ , ρ_{β}	20—900
9	ЭИ107	0,40	0,50	2,33	10,5	0,70	0,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	λ , ρ_{β}	20—700
9а	ЭИ107	0,40	0,38	2,4	10,8	0,82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	σ	20—600

* Марка стали обозначена не по ГОСТу, а по химическому составу.

Таблица IV-43

Коэффициент теплопроводности высоколегированных сталей с особыми свойствами λ , Вт/(м·°С)

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °С													
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1300
1	Г13	11,9	—	14,7	16,3	18,0	19,3	20,5	21,8	22,6	23,5	24,3	25,6	26,7	28,0
2	Г20Х12Ф	—	13,7	14,7	15,9	17,2	18,4	19,7	20,9	22,1	23,3	—	—	—	—
3	Х21Х15Т	—	13,7	14,7	15,9	17,2	18,4	19,7	20,9	22,1	23,3	—	—	—	—
4	Х13Н13К10	—	—	13,4	15,1	17,2	18,8	20,5	22,2	23,8	25,7	27,4	—	—	—
5	Х19Н10К17	—	—	14,7	16,3	18,0	19,7	21,4	23,0	24,3	25,9	—	—	—	—
6	Р18	24,3	—	25,9	27,2	28,0	28,5	28,0	27,2	26,7	25,9	—	—	—	—
7	ЭР	—	25,7	27,3	29,1	29,1	28,8	28,3	28,5	28,3	27,8	—	—	—	—
7а	ЭР	—	24,4	26,2	27,1	27,1	27,8	28,3	27,9	26,9	—	—	—	—	—
8	ЭХ12	—	33,0	36,4	36,4	34,3	32,6	30,8	29,3	28,0	—	—	—	—	—
9	ЭИ107	16,7	—	18,4	19,9	21,7	22,4	23,6	24,7	28,5	26,9	—	—	—	—

Таблица IV-44

Средняя теплоемкость c , кДж/(кг·°С), высоколегированных сталей с особыми свойствами в интервале температур 50— t , °С

Номер марки стали	Марка	Температура, °С												
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
1	Г13	0,519	0,528	0,540	0,553	0,561	0,569	0,574	0,578	0,582	0,595	0,603	0,607	0,611
6	Р18	0,410	0,410	0,423	0,431	0,439	0,448	0,456	0,465	0,473	0,486	0,494	0,502	0,515
9а	ЭИ107*	—	—	—	—	—	—	0,532	—	0,561	—	0,586	—	—

Продолжение табл. IV-44

Номер марки стали	Марка	Температура, °С												
		750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	
1	Г13	0,611	0,615	0,619	0,619	0,624	0,624	0,628	0,632	0,652	0,636	0,641	0,641	0,641
6	Р18	0,528	0,540	0,548	0,561	0,561	0,565	0,565	0,569	0,569	0,574	0,574	0,574	0,574
9а	ЭИ107*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

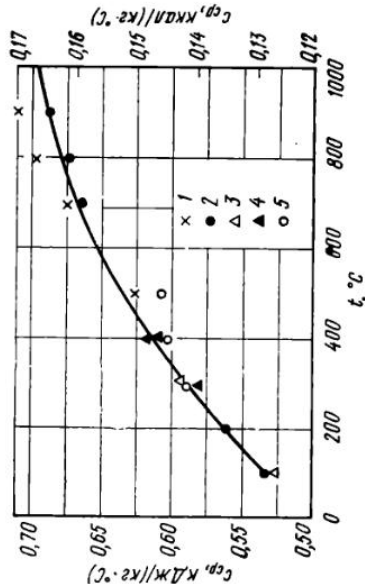
* Значения $c_{ср}$ даны в интервале температур от 20 до t °СРис. 32. Зависимость теплоемкости марганцевых сплавов с различным содержанием марганца от температуры. Содержание Mn, %:
1 — 40; 2 — 20; 3 — 17; 4 — 14,7; 5 — 11

Таблица IV-45

Теплоемкость c , кДж/(кг·°С), высоколегированных сталей с особыми свойствами при различной температуре

Температурный интервал, °С	Г13		Температурный интервал, °С	Р18		Температурный интервал, °С	Р18	
	Г13	Р18		Г13	Р18		Г13	Р18
50—100	0,519	0,410	500—550	0,695	0,582	900—950	0,666	0,582
100—150	0,540	0,427	550—600	0,703	0,599	950—1000	0,674	0,595
150—200	0,565	0,435	600—650	0,641	0,615	1000—1050	0,682	0,607
200—250	0,565	0,452	650—700	0,641	0,636	1050—1100	0,687	0,615
250—300	0,599	0,465	700—750	0,649	0,716	1100—1150	0,695	0,611
300—350	0,607	0,487	750—800	0,649	0,716	1150—1200	0,695	0,611
350—400	0,607	0,502	800—850	0,657	0,682	1200—1250	0,703	0,611
400—450	0,615	0,523	850—900	0,666	0,737	1250—1300	0,708	0,611
450—500	0,615	0,553						

Таблица IV-46

Плотность ρ , г/см³, высоколегированных сталей с особыми свойствами

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °С											
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1	Г13	7,877	7,834	7,785	7,730	7,672	7,632	7,595	7,538	7,464	7,378	7,330	7,263
2	Г20Х12Ф	7,66	7,62	7,58	7,54	7,47	7,42	7,35	7,28	—	—	—	—
3	Г21Х15Т	7,66	7,63	7,58	7,53	7,46	7,41	7,36	7,29	7,22	—	—	—
6	Р18	8,696	8,667	8,635	8,602	8,569	8,534	8,498	8,462	8,425	8,430	8,372	8,313

Таблица IV-47

Коэффициент температуропроводности a , м²/ч, высоколегированных сталей с особыми свойствами

Температурный интервал, °С	Марка стали		Температурный интервал, °С	Марка стали		Температурный интервал, °С	Марка стали	
	Г13	Р18		Г13	Р18		Г13	Р18
50—100	0,0126	0,0259	400—450	0,0148	0,0240	750—800	0,0173	0,0155
100—150	0,0130	0,0256	450—500	0,0155	0,0216	800—850	0,0173	0,0162
150—200	0,0130	0,0259	500—550	0,0144	0,0202	850—900	0,0177	0,0155
200—250	0,0134	0,0252	550—600	0,0144	0,0195	900—950	0,0180	0,0198
250—300	0,0137	0,0252	600—650	0,0162	0,0188	950—1000	0,0184	0,0198
300—350	0,0140	0,0245	650—700	0,0166	0,0180	1000—1050	0,0187	0,0198
350—400	0,0148	0,0238	700—750	0,0169	0,0159	1050—1100	0,0181	0,0198

Таблица IV-48

Удельное электросопротивление ρ_a 10⁶, Ом·см, высоколегированных сталей с особыми свойствами

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °С														
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
1	Г13	66,5	68,3	75,6	84,7	93,1	99,4	95,2	103,8	114,7	120,0	123,8	125,3	127,0	128,8	130,8
2	Г20Х12Ф	—	72,3	79,2	85,1	91,2	97,1	101,5	106,5	109,2	113,0	—	—	—	—	—
3	Г21Х15Т	—	—	82,4	88,9	95,6	100,2	104,5	108,5	112	115,5	119,2	—	—	—	—
4	Х13Н13К10	—	—	90,0	95,6	100,8	105,6	109,6	112,8	115,4	117,5	119,6	—	—	—	—
5	Х19Н10К47	—	—	90,5	94,6	98,6	102,1	105,2	108,1	110,8	113,4	—	—	—	—	—
6	Р18	40,6	41,9	47,2	54,4	62,7	71,8	81,5	92,2	103,7	115,2	117,3	120,9	123,6	126,6	128,1
7	ЭР	—	42	48	55	—	—	93,5	98	102	108	116	—	—	—	—
7а	ЭР	—	50	62,5	69,5	77	84	91,5	98,5	106	113	120	—	—	—	—
8	ЭХ12	—	31	36	43	53	64	75	86	97	108	119	—	—	—	—
9	ЭИ107	—	86	91	96	101	106,5	112	117	122	—	—	—	—	—	—

Таблица IV-49

Средний коэффициент линейного расширения β 10⁶, 1/°С, высоколегированных сталей с особыми свойствами в интервале температур от 20 до t , °С

Номер марки стали	Марка стали	Температура, °С												
		50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
1	Г13	17,34	18,01	19,37	20,71	21,71	20,76	19,96	20,49	21,86	23,45	23,13	23,61	25,60
2	Г20Х12Ф	—	15,4	17,6	18,9	21,20	21,6	23,1	25,0	—	—	—	—	—
3	Г21Х15Т	—	15,3	17,6	19,8	21,80	22,7	23,0	24,1	25,2	—	—	—	—
6	Р18	10,98	11,23	11,71	11,98	12,20	12,41	12,62	12,79	12,97	11,35	12,44	13,34	14,09

Таблица IV-50

Теплофизические свойства жаростойких и жаропрочных сталей*

Марка стали	Химический состав, %					Плотность ρ , г/см ³	Удельное электросопротивление R_{20} , Ом·мм ² /м	Коэффициент линейного расширения β 10 ⁻⁶ , 1/°C	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)	Теплоемкость истинная c_p , кДж/(кг·°C)
	C	Si	Mn	Cr	Ni					
X18 X25	0,9—1,0	<0,8	<0,7	17,0—19,0	<0,6	7,6	0,65—0,67 (20) 0,68 (0); 0,88 (200)	10,5 (200—100)	23,3 (20)	0,503 (20)
	<0,2	<1,0	<0,8	23,0—27,0	<0,6					
X251*2 (ЭИ439)	<0,15	<1,0	<0,8	23,0—27,0	<0,6	7,6	1,02 (400); 1,13 (600) 1,22 (800); 1,27 (1000)	10,0—10,7 (20—100)	20,9 (20)	0,503 (20)
	<0,15	<1,0	<0,8	27,0—30,0	<0,6					
X9C2 (ЭСХ8) X25СЗН; (ЭИ261)	0,35—0,5	2,0—3,0	<0,7	8,0—10,0	<0,6	7,6	0,75 (20) 0,8 (20)	10,7 (20—100)	20,9 (20)	0,46 (20)
	<0,35	2,5—3,5	<0,7	23,0—27,0	0,7—1,30					
X23Н18 (ЭИ417)	<0,2	<1,0	<2,0	22,0—20,0	17,0—20,0	7,8	0,85—1,00 (100) 0,90—1,05 (200) 1,00—1,10 (400) 1,12—1,17 (600) 1,19—1,23 (800) 1,21—1,26 (900)	15,0—16,2 (20—100)	13,2—17,4 (100) 14,2—19,1 (200) 16,6—19,7 (400) 22—29 (600) 25—31,4 (600) 26,7—29 (900)	0,503 (20)
	0,15	1,0—2,0	1,0—1,0	15—20	30—35					
X20Н35						7,95	1,3 (200) 1,20 (400) 1,24 (600) 1,28 (800) 1,32 (1000)	16,0—(20—100)	—	0,503 (20)

Примечание. В скобках приведена температура, °C.

*1. Марки обозначены по ГОСТУ, а по химическому составу стали.
*2. Сталь X25T(ЭИ439) содержит 0,6—0,8% Ti.

6. Стали для отливки

Таблица IV-51
Теплофизические свойства сталей для отливки

Марка стали	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент линейного расширения β , 10^{-6} , $1/^\circ\text{C}$, при температуре, $^\circ\text{C}$							Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м \cdot °C), при температуре, $^\circ\text{C}$							Критические точки, $^\circ\text{C}$					
		25—100	25—200	25—300	25—400	25—500	25—600	25—700	25—800	100	200	300	400	500	600	700	A_{c1}	A_{c2}	A_{c3}		
		См. сталь марки 25							См. сталь марки 25												
25Л	7,83	11,5	12,9	13,0	13,2	13,5	13,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	735	840	680	824
20ХМЛ	—	10,86	12,43	12,78	13,12	13,57	13,94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20ХМФЛ	7,8	10,0	11,9	12,9	13,1	13,5	13,8	14,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	777	868	683	800
20—20	7,81	—	—	15,5* ¹	15,6* ¹	15,9* ¹	16,2* ¹	16,6* ¹	17,2* ¹	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1Х18Н9ТЛ	—	14,8	15,97	16,86	17,11	17,6	17,97 и 18,26* ²	18,38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЛА1, ЛА4 и ЛА5	—	15,23* ³ и 16,24* ⁴	17,94* ⁴	18,56* ⁴	19,20* ⁴	20,17* ⁴	20,56* ⁴	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
— ЛА3	8,065	—	—	—	16,7	17,1	17,4	17,8	18,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
— ЛА6	8,06	15,1	15,9	16,9	18,0	18,2	18,4	19,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*¹ Значения приведены для интервала температур от 25 $^\circ\text{C}$. *² Для интервала 25—630 $^\circ\text{C}$. *³ При 20 $^\circ\text{C}$. *⁴ Для конечной температуры интервала.

7. Чугуны

Таблица IV-52
Химический состав литейных чугунов по ГОСТ 4832—58

Марка стали	углерод	кремний	марганец				фосфор							сера						
			группа				класс							категория						
			I	II			А	Б			В				Г	I	II			
не более		обычный		фосфористый				не более												
ЛК00	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,03
ЛК0	3,5—4,0	2,76—4,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,03	0,03
ЛК1	3,6—4,1	2,76—3,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,03	0,03
ЛК2	3,7—4,2	2,26—2,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,04	0,04
ЛК3	3,8—4,3	1,76—2,25	0,50—0,90	0,91—1,30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,04	0,04
ЛК4	3,9—4,4	1,25—1,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,04	0,05	0,05

Таблица IV-53

Коэффициент теплопроводности λ чугунов

Чугуны	Состав, %										Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С				
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	S + P	0	100	200	300	400	
Обыкновенный	2,61	2,46	0,45	—	—	—	—	—	—	48,5	46,1	44,1	42,8	41,9	
	3,11	2,26	0,39	—	—	—	—	—	—	49,0	46,5	44,5	43,2	42,4	
	3,20	1,56	0,72	—	—	—	—	—	—	53,2	50,6	48,6	46,5	45,1	
Молибденохромистый	3,12	2,31	0,39	—	0,54	0,77	—	—	—	50,3	49,7	47,7	46,5	45,6	
Молибденовый	2,56	2,20	0,63	—	—	0,58	—	—	—	50,5	49,4	47,7	46,5	45,4	
Хромоникелевый	2,8	2,51	0,68	4,71	0,54	—	—	—	—	44,0	42,3	41,3	40,5	39,0	
	3,41	1,03	0,65	1,49	0,54	—	—	—	—	49,2	48,6	47,0	45,8	44,3	
Марганцевоникелевый	3,10	2,51	3,11	1,00	—	—	—	—	—	42,9	42,0	41,4	40,7	40,6	
Никельрезист	2,41	1,80	0,62	13,7	3,37	—	6,41	—	—	35,9	33,8	32,4	31,5	31,3	
Никросилал	1,91	6,42	—	18,65	2,02	—	—	—	—	30,4	29,3	27,9	26,7	26,3	
Хромоалюминиевый	2,7	0,96	0,58	—	0,95	—	—	7,30	—	34,4	33,0	32,4	31,4	30,1	
Медистый	3,18	1,58	0,69	—	—	—	1,58	—	—	48,7	47,1	44,4	43,8	41,1	
	3,18	1,59	—	—	—	—	0,99	—	—	45,8	44,4	43,1	41,9	41,0	
	3,18	1,49	—	—	—	—	1,98	—	—	48,1	46,0	43,5	41,4	38,8	
	2,20	1,50	—	—	—	—	0,53	—	—	44,5	43,1	41,8	41,0	39,6	
	3,16	1,44	—	—	—	—	3,10	—	—	47,6	46,0	44,0	42,6	41,1	
	3,15	1,58	—	—	—	—	1,43	—	—	45,7	44,4	43,1	41,4	40,2	

Чугун	Состав, %											Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С				
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	S + P	0	100	200	300	400		
										+	+	+	+	+		
Обыкновенный чистый	3,16	1,54	—	—	—	—	—	—	—	47,6	45,9	44,1	43,1	41,6		
Серый чугун	3,00	—	—	—	—	—	—	—	—	58,7	—	—	—	46,3		
	3,08	1,24	0,94	—	0,08	—	0,36	—	+	54,5	53,0	51,0	48,6	45,8		
	3,25	1,91	0,97	—	0,07	—	0,81	—	+	49,7	46,5	46,4	43,9	41,9		
	3,32	1,52	2,43	—	0,01	—	0,71	—	+	51,3	49,0	47,0	44,4	42,3		
Отожженный ковкий чугун	3,19	1,42	0,96	—	0,20	—	—	—	—	55,0	53,2	51,0	48,6	42,4		
Жидкий чугун	2,8	0,39	0,1	—	0,09	—	0,06	—	+	—	47,6	42,7	45,3	45,4		
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16,7*	—	—	—	—		

Примечание. Плюсом обозначено наличие S+P, минусом — отсутствие.

* При 1400°С.

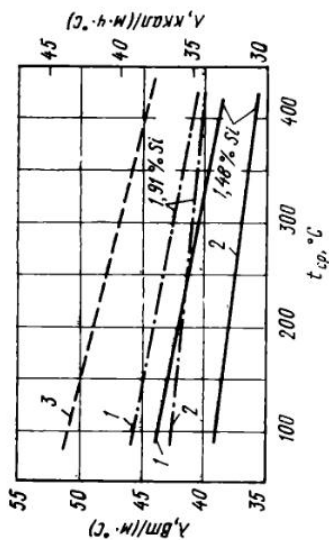


Рис. 33. Зависимость коэффициента теплопроводности чугуна изложницы от температуры t .
1 — до службы; 2 — после нее; 3 — обычный термобработанный чугун

Таблица IV-54

Теплоемкость $c_{ср}$ и удельная энтальпия i серых чугунов различного состава

Температура, °С	$c_{ср}$, кДж	i , кДж/кг	$c_{ср}$, кДж	i , кДж/кг	$c_{ср}$, кДж	i , кДж/кг	$c_{ср}$, кДж	i , кДж/кг
	(кг·°С)	кДж/кг	(кг·°С)	кДж/кг	(кг·°С)	кДж/кг	(кг·°С)	кДж/кг
	Состав, %							
	3,71 С; 1,5 Si; 0,63 Mn; 0,147 P; 0,069 S		3,72 С; 1,41 Si; 0,88 Mn; 0,54 P; 0,078 S		3,61 С; 2,02 Si; 0,80 Mn; 0,88 P; 0,080 S		2,2 С; 1,48 Si; 0,73 Mn; 0,12 P; 0,023 S	
100	—	—	—	—	—	—	0,5443	54,43
200	0,4605	92,11	0,3768	75,36	0,2901	57,99	—	—
300	0,4932	147,92	0,4363	130,84	0,3761	113,46	0,5582	167,47
400	0,5079	203,14	0,4652	186,06	0,4220	168,73	0,5652	226,09
450	—	—	—	—	0,4367	196,57	—	—
500	0,5171	258,53	0,4836	241,79	0,4480	223,99	0,5862	293,08
550	0,5234	287,84	0,4911	270,05	0,4576	251,63	—	—
600	0,5346	320,83	0,5024	301,45	0,4710	282,61	0,6071	364,25
650	0,5548	360,48	0,5192	337,46	0,4861	315,89	—	—
700	0,6025	421,82	0,5543	387,91	0,5125	358,81	0,6400	447,99
750	0,6477	485,84	0,6125	459,50	0,5681	426,22	—	—
800	0,6661	532,98	0,6372	509,78	0,6075	486,09	0,6908	552,66
850	0,6736	572,75	—	—	0,6251	531,30	—	—
900	0,6766	608,76	0,6548	590,34	0,6305	568,57	0,7118	640,58
950	0,6766	642,67	0,6556	623,00	0,6343	600,81	—	—
1000	0,6753	675,33	0,6544	654,40	0,6322	632,21	0,7201	720,13
1050	0,6741	707,57	0,6519	684,54	0,6301	661,51	—	—
1100	0,6720	738,97	0,6510	715,94	0,6301	692,92	0,7308	803,87
1150	0,8847	1017,39	0,8608	988,08	0,8428	967,15	—	—
1200	0,8721	1046,70	0,8495	1019,48	0,8323	998,55	0,9071	1088,57
1250	0,8608	1076,01	0,8382	1047,96	0,8206	1025,77	—	—
1300	0,8512	1106,57	0,8281	1076,01	0,8110	1054,24	0,9082	1180,68
1350	0,8420	1136,72	0,8173	1103,22	0,8001	1080,19	—	—

Таблица IV-55

Влияние содержания углерода, марганца, хрома и кобальта на электросопротивление чугуна

Содержание, %							Удельное электросопротивление, ρ_z , мкОм·см	
С	С _{гр}	Si	Mn	Al	Cr	Co	в литом состоянии	после отжига при 875 °С
2,64	1,25	1,72	0,23	—	—	—	61,94	59,04
2,82	1,44	1,74	0,63	—	—	—	59,36	59,50
2,69	1,20	1,73	1,07	—	—	—	59,40	62,10
2,73	1,32	1,70	1,49	—	—	—	64,95	66,15
2,65	—	1,47	2,66	—	—	—	66,50	—
3,61	2,65	0,03	Следы	0,87	—	—	50,30	—
3,63	2,15	0,03	»	1,52	—	—	74,60	—
3,52	1,89	0,02	»	2,33	—	—	75,00	—
3,64	2,30	0,023	»	2,51	—	—	86,25	—
3,50	1,31	0,025	»	2,83	—	—	87,10	—
3,61	2,25	0,018	»	3,60	—	—	89,30	—
3,42	1,85	0,02	»	4,09	—	—	94,70	—
3,59	1,38	2,63	0,02	—	0,63	—	90,63	—
2,42	1,48	3,63	Следы	—	1,06	—	—	—
2,45	1,39	3,12	0,015	—	1,79	—	113,5	—
2,10	—	1,17	0,01	—	7,51	—	64,6	—
2,76	1,48	2,08	0,045	—	—	1,86	82,6	—
2,91	1,34	0,905	0,02	—	—	6,51	68,8	—
2,36	1,11	0,66	0,01	—	—	19,9	38,9	—
2,20	1,37	0,65	0,01	—	—	23,3	34,4	—

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Таблица V-1

Предел прочности σ_B различных сталей в зависимости от температуры

Марка стали	Предел прочности σ_B , МН/м ² , при температуре, °С										Термическая обработка		
	20	100	200	300	350	400	450	500	550	600		650	700
10	421,7	402,1	485,4	514,8	—	372,6	—	255,0	186,3	107,9	—	—	Нормализация 900—920°C Состояние поставки То же После прокатки
15	396,2	366,8	437,4	429,5	—	394,2	—	277,5	—	147,1	—	75,5	
20	395,2	370,7	475,6	434,4	—	352,0	302,0	210,8	182,4	139,2	—	—	
25	492,3	498,2	561,9	539,4	—	466,8	396,2	330,5	249,1	154,9	—	—	Состояние поставки То же После прокатки
30	534,5	506,0	578,6	580,6	—	502,1	420,7	357,9	291,2	193,2	—	—	
35	534,5	506,0	578,6	508,6	—	502,1	420,7	357,9	291,2	193,2	—	—	
45	626,6	583,3	688,4	713,9	—	581,9	479,5	375,6	306,0	217,7	—	—	Состояние поставки То же После прокатки
15К	402,1	392,3	470,7	466,8	431,5	372,7	304	250,1	191,2	112,8	—	—	
20К	441,3	392,3	519,8	500,1	431,5	372,7	304	250,1	191,2	112,8	—	—	
22К	500,1	460,9	490,3	519,8	470,7	451,1	323,6	284,4	186,3	137,3	—	—	Нормализация Нагрев 950°C, воздух, отпуск 680—690°C, воздух
25К	519,8	490,3	568,3	568,8	500,1	470,7	470,7	313,8	255,0	166,7	—	—	
22ГК	593,3	559,0	608,0	647,2	—	544,3	490,3	357,9	—	196,1	—	—	
16М	539,4	—	519,8	—	549,2	—	460,9	392,3	328,5	274,6	—	—	Нормализация Нагрев 950°C, воздух, отпуск 680—690°C, воздух
12МХ	446,2	422,7	449,1	473,7	—	449,1	428,6	397,2	357,9	306,0	—	—	
15ХМ	529,6	—	—	—	500,1	492,3	480,5	441,3	411,9	304,0	—	—	
12ХМФ	490,3	451,1	451,1	480,5	—	431,5	392,3	343,2	—	215,7	—	—	Нагрев 900—920°C, воздух, отпуск 690—650°C Нормализация 980—1000°C, отпуск 740—760°C Нормализация 1000—1020°C, отпуск 740°C, 2 ч
12Х1МФ	533,5	—	—	—	—	—	333,4**	326,6**	277,5**	—	—	—	
12Х2ФБ	403,0	—	—	—	—	—	—	181,4**	157,9**	117,7**	—	—	
ЭИ454	512,9	—	—	—	—	392,2	322,6	418,7	—	358,9	260,9	—	Нагрев 860—870°C, воздух Ретортах Нормализация 880—900°C, отпуск 680—680°C, 8—12 ч
ЭИ631	448,2	—	—	—	—	—	—	304,0	265,8	265,8	196,1	—	
16ГНМ	514,8	—	—	—	501,1	478,6	427,6	368,3	—	283,4	154,9	—	

Марка стали	Предел прочности σ_B , МН/м ² , при температуре, °С										Термическая обработка		
	20	100	200	300	350	400	450	500	550	600		650	700
30X	833,6	764,9	774,7	794,3	784,5	647,2	603,1	500,1	—	—	—	—	Закалка 860°С, масло; отпуск 500°С, HB260—269
38XA	936,5	—	887,5	877,7	—	686,5	588,4	490,3	—	—	—	—	Закалка 820—840°С, масло, отпуск 550°С, 3 ч
40X	936,5	—	887,5	877,7	—	686,5	588,4	490,3	—	—	—	—	То же
20XM	563,9	—	—	534,5**	534,5**	529,6**	475,6*10	441,3**	402,1*11	—	—	—	Отжиг 850°С, закалка 860—870°С, масло, отпуск 680—700°С, охлаждение с печью до 300°С, обработка в печи до 300°С, отпуск 50°/ч, HB170—187
30XM	730,6	—	661,9	715,9	—	632,5	578,6	500,1	460,9	348,1	—	—	Закалка 1050—1100°С, 30 мин, воздух
X18H11B	559,0	—	—	—	—	—	—	392,3	—	362,8	304,0	245,2	То же
ЭИ724	637,4	—	—	—	—	—	—	431,5	464,8	362,4	304,0	304,0	Закалка 870—880°С, масло, отпуск 650°С
IX14H14B2M (ЭИ257)	559,0	—	—	—	—	—	—	—	—	443,3	425,6	397,2	Закалка 1050—1100°С, 30 мин, воздух
IX14H14B2MГ (ЭИ257 с литием)	577,6	—	—	—	—	—	—	—	—	371,7	322,6	311,8	Дух
IX13H16B (ЭИ694)	563,9	—	—	—	—	—	—	—	—	396,2	351,1	326,6	Нагрев 1100°С, выдержка 2 ч, воздух
IX13H16B2B (ЭИ695)	583,5	—	—	—	—	—	—	—	—	433,4	387,2	362,8	Закалка 1140—1160°С, вода
X23H13	649,2	—	—	—	—	—	—	—	580,6	523,7	466,8	379,5	Закалка 1050°С, вода
X23H18 (ЭИ417)	655,1	—	—	530,5	—	547,2	—	530,5	—	448,2	397,2	324,6	Закалка 1180°С, вода, старение 800°С, 4 ч
X18H25C2	838,5	—	686,5	733,5	—	711,0	—	686,5	622,7	568,8	—	429,5	Нагрев 1200°С, вода, 800°С, выдержка 8 ч
4X14H14B2M (ЭИ69)	777,7	—	—	—	—	—	—	—	570,7	491,3	439,3	338,3	Закалка 1175°С, вода, старение 50°С, 5 ч
H123	589,4	531,5	506,0	462,9	—	471,7	—	459,0	490,3	434,4	—	395,2	Нормализация 1050—1100°С
ЭИ572	598,2	—	—	559,0	—	—	519,6	519,6	490,3	490,3	411,9	343,2	Закалка 1150—1180°С, вода, старение 750°С, 12—15 ч
ЭИ400	586,4	—	454,0	453,1	—	447,2	578,6	432,5	519,6	509,9	470,7	421,7	Закалка 1150°С, вода, старение 750°С, 10 ч
ЭИ403	642,3	—	519,8	497,2	—	509,0	—	454,8	—	408,9	353,0	346,2	Закалка 1150°С, вода, старение 800°С, 16 ч
ЭИ405	549,2	—	—	470,7	—	470,7	460,9	460,9	441,3	421,7	402,1	—	Нормализация 1100—1130°С, старение 750°С, 10—12 ч
ЭИ395	637,4	—	732,6	509,0	—	519,8	509,9	509,9	490,3	470,7	441,3	440,3	Закалка 1180°С, вода, двойное старение 700°С, 50 ч и 800°С, 10 ч
ЭИ424	820,2	745,3	725,7	715,9	—	696,3	706,1	666,8	666,8	607,0	534,5	445,2	Закалка 1200°С, вода, старение 700°С, 48—100 ч и 1180°С, 1 ч, старение 780°С, 8—10 ч и 730°С, 25 ч
ЭИ612	784,5	794,3	764,9	735,5	—	725,7	706,1	696,3	666,8	666,8	617,8	490,3	—

Марка стали	Предел прочности σ_B , МН/м ² при температуре, °С											Термическая обработка			
	20	100	200	300	350	400	450	500	550	600	650		700		
ЭИ434 (ХН10К)	816,9	—	—	711,0	—	715,9	—	—	—	673,7	—	613,9	—	441,3	Закалка 1210°С, вода, двойное старение 700°С, 24 ч и 850°С, 3 ч
ЭИ388	918,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	625,7	—	Закалка 1180°С, выдержка 1 ч, вода, нагрев 1000°С, 1 ч
ЭИ612К	{ 637,4 735,5 1061,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	441,3 509,9 539,4	—	Нагрев 1200°С, вода, старение 700°С, 50 ч
ЭИ473 (ХН80Т)	{ 1061,1 1029,7	—	—	908,1	—	826,7	—	—	—	787,5	—	604,1	539,4	—	Закалка 1080°С, выдержка 2 ч, вода 1000°С, 1 ч, воздух 700°С, 16 ч
ЭИ607	{ — 480,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	666,8	—	Закалка 1100°С, выдержка 5 ч, вода; тройное ступенчатое старение
ЭИ607А	{ 480,5 421,7 608,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	392,3	—	То же Отжиг 900°С
25Л	{ 421,7 451,1 617,8	—	—	372,6 451,1 588,4	—	343,2 451,1 549,2	—	—	—	225,6 294,2 441,3	—	107,9 156,9 255,0	—	—	Закалка 850—860°С, через воду в масло, отпуск 630°С
35ХМ, 34ХМ	{ 706,1 727,6	—	—	735,5	—	578,6	—	—	—	505,0	—	338,3	—	—	То же
35ХМФА	{ 839,4 878,7	—	—	—	—	714,9	—	—	—	625,7	—	—	—	—	Закалка 930—950°С, масло, отпуск 620—660°С
25Х2МФА	{ 878,7 1049,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Закалка 930—950°С, масло, отпуск 620—660°С
Р2	676,6	—	—	—	—	—	—	—	—	505,0	—	—	—	—	Двойная нормализация: 970—980 и 930—950°С, отпуск 680—700°С
ЭИ723	1078,7	—	—	—	—	—	—	—	—	820,8	—	706,1	—	—	Нормализация 1030—1050°С, отпуск 650—660°С, 6 ч, воздух
ЭИ415	836,5	—	—	737,5	—	740,4	—	—	—	625,7	—	432,5	—	—	Нормализация 1150°С, закалка 1050°С, масло, отпуск 700°С
21Н5	{ 631,4 686,5	—	—	637,4	—	529,6	—	—	—	353,0	—	171,6	—	—	Улучшение, НВ 187—207
40Н	{ 701,2 726,7	—	—	627,6	—	549,2	—	—	—	372,7	—	210,8	—	—	Закалка в масле и отпуск
40ХН	789,4	—	—	686,5	—	538,4	—	—	—	485,4	—	353,0	—	—	Нормализация, ВН 197
12ХН3А	{ 549,3 578,6	—	—	539,4	—	465,8	—	—	—	348,1	—	201,0	—	—	Нормализация 880—900°С, отпуск 630°С, 3 ч
34ХН3М	1010,1	—	—	916,9	—	828,7	—	—	—	686,5	—	392,3	—	—	Улучшение, НВ 293—311
35ХН3МФ	{ 843,4 933,6	—	—	814,0	—	740,4	—	—	—	549,2	—	333,4	—	—	Отжиг 880°С, закалка 830—830°С
50ХФА	1127,8	—	—	1078,7	—	814,0	—	—	—	637,4	—	—	—	—	через воду в масло, отпуск 670—680°С
60С2	1044,4	—	—	951,2	—	706,1	—	—	—	441,3	—	—	—	—	Закалка 860°С, масло, отпуск 600°С
38ХМЮА	809,0	—	—	814,0	—	725,7	—	—	—	470,7	—	299,1	—	—	Закалка 900—940°С, масло, отпуск 660°С, 5 ч, воздух, НВ 255

Марка стали	Предел прочности σ_B , МН/м ² при температуре, °С											Термическая обработка	
	20	100	200	300	350	400	450	500	550	600	650		700
1Х13	603,1	—	529,6	—	—	490,3	—	362,8	—	225,6	—	—	Нагрев 1030—1050°С, масло, отпуск 750°С
2Х13	706,1	—	—	539,4	—	519,8	485,4	431,5	343,2	—	—	—	Нормализация 1000—1020°С, воздух, отпуск 720—750°С
3Х13	946,3	—	819,9	783,6	—	706,1	—	608,0	529,6	451,1	—	—	Нормализация 1000°С, отпуск 650°С
4Х13	1118,4	—	941,4	902,3	—	779,6	—	519,8	—	304,0	—	—	Нагрев 1050°С, воздух, отпуск 600°С, 3 ч
Х10С2М (ЭИ107)	941,4	844,4	818,9	833,6	—	764,9	—	666,9	—	431,5	220,6	—	Закалка 1100°С, масло, отпуск 800°С, вода, НВ 229
15Х11МФ	730,6	—	—	—	—	—	—	—	529,6	441,3	—	—	Нормализация 1050°С, отпуск 740°С, 2 ч, НВ269
ЭИ802 (15Х12ВМФ)	872,8	—	735,5	715,9	—	671,8	—	549,2	505,0	372,7	294,2	—	Закалка 1000°С, масло, отпуск 680°С, 10 ч
ЭИ756 (1Х12В2МФ)	870,8	—	—	—	—	—	—	—	—	437,4	379,5*12	—	Закалка 1050°С, масло, отпуск 680°С, 3 ч, воздух, НВ 270
1Х18Н9Т (ЭЯ1Т)	539,4	431,5	372,7	284,4	—	259,9	—	294,2	397,2	279,5	294,2	289,3	Закалка 1130—1160°С, воздух или вода, старение 800°С, 10 ч или 700°С, 20 ч
1Х18Н12Т 20ХМЛ	644,5 470,7 549,2	—	—	—	—	431,5	411,9	470,7 377,6	—	411,9 289,3	354,7 235,4	306,9	Закалка 1050°С, масло, отпуск 680°С, 3 ч, воздух, НВ 270
20ХМФЛ	490,3 676,6	—	470,7 608,0	480,5 608,0	—	470,7 559,0	451,1 549,2	431,5 509,9	313,8 460,9	274,6 402,1	—	218,7	Двойная нормализация 940—950 и 920°С, отпуск 690—710°С
1Х18Н9ТЛ	598,2 657,0	—	—	—	333,4 372,7	353,0 372,7	—	343,2	304,0	274,6	274,6	225,6— 255,0	Нагрев 1100°С, выдержка 4 ч, воздух, отпуск 800°С, выдержка, охлаждение с печью
Х25Н13ТЛ	490,3 598,2	—	—	—	—	—	—	—	407,0	382,5— 402,1	382,5	—	Нагрев 1160—1180°С, воздух, старение 700 и 760—780°С 10 ч
ЛЛ1, ЛЛ4, ЛЛ5	431,5 519,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	284,4— 382,5	245,2	Нагрев 1150—1170°С, воздух, старение 770—800°С, 10 ч
ЛЛ3	451,1 573,7	—	—	382,5	—	—	—	343,2 509,5	—	294,2— 353,0	274,6— 323,6	—	Нормализация 1180°С, отпуск 800°С, 4 ч
ЛЛ6	333,4 460,9	—	—	—	—	—	—	—	279,6	255,0— 274,6	255,0— 274,6	—	Нормализация 1180°С, двойное старение 800°С, 6 ч и 750°С, 16 ч НВ 156

*1 При 480°С. *2 При 520°С. *3 При 560°С. *4 При 540°С. *5 При 580°С. *6 При 620°С. *7 При 320°С. *8 При 370°С. *9 При 420°С. *10 При 470°С. *11 При 570°С. *12 При 625°С.

Таблица V-2

Основные свойства некоторых жароупорных сталей

Тип, марка стали	Температура плавления $t_{пл}$, °С	Температура начала интенсивного окисления на воздухе $t_{ок}$, °С	Предел прочности при растяжении σ_B , МН/м ²	Условный предел ползучести при удлинении на 1% за 10 000 ч $\sigma_{пл}$, МН/м ²	Допустимое напряжение $\sigma_{доп}$, МН/м ²	Область применения
Хромистые: X18 (ЭИ229)	1490—1510	850—900	490,3; 200 245,2; 600	441,3; 400 58,8—88,3 800	88,3; 500 9,8 700	25,5; 600 1,470 800
Высокохромистые: X25 (ЭИ181)	1490—1510	1100—1150	490,3; 400	416,8; 600	98,07; 500	24,5 600
X25Т (ЭИ439)	—	—	186,3; 700	78,5; 800	6,9; 700	5,9 700
X28 (ЭЖ27, ЭИ349)	—	—	39,2; 900	—	0,294 850	1,470 800
Сильхромоновые: X9С2 (ЭСХ8)	1470—1490	800	882,6—1078,6 20	—	—	—
X25С3Н (ЭИ261)	1470—1490	1100	980,7—1176,8 20	—	—	—
Высоколегированные: X23Н18 (ЭИ417)	1400—1430	1000	588,4—686,5; 20 470,7—617,8; 400	539,4—657,0; 200 382,5—519,8 600	68,6—78,5; 600 9,8—19,6 800	49,0—68,6; 600 9,8—17,7 800
X20Н35	1400—1420	1100	235,4—323,6; 800 588,4; 20 343,2	58,8—78,5; 1000 411,9; 700 166,7	4,9—6,9; 900 37,3 700 9,8	1,96—2,9 1000 11,8 800 1,470 1000

* В знаменателе дается температура определения (°С) соответствующих свойств.

Таблица V-3

**Предел прочности некоторых марок стали и сплавов
при повышенных температурах
(испытания при прямом нагреве)**

Марка стали или сплава	Предел прочности σ_B , МН/м ² , при температуре, °С						
	700	800	900	1000	1100	1200	1300
15	54,9	56,9	44,1	27,4	23,5	13,7	—
У7	84,3	59,8	37,3	30,4	18,6	10,8	—
У12	70,6	67,7	27,5	23,5	14,7	12,7	—
12ХНЗА	127,5	79,4	51,0	39,2	27,5	15,7	12,7
18ХНВА	224,6	110,8	64,7	48,1	26,5	18,6	14,7
30ХГСА	95,1	72,6	41,2	35,3	21,6	17,6	—
60СА	163,4	79,4	55,9	33,3	25,5	32,4	5,9
Х12М	140,2	122,6	81,4	46,1	24,5	7,8	—
P9	192,2	90,2	81,4	55,9	32,4	20,6	—
P18	221,6	111,8	107,9	66,7	31,4	20,6	—
1Х13	64,7	35,3	26,5	36,3	21,6	11,8	—
Х9С2	137,3	51,0	58,8	45,1	22,6	15,7	—
Х17	84,3	40,2	21,6	20,6	13,7	7,8	5,9
Х28	75,5	25,5	18,6	10,8	7,8	7,8	—
1Х25105	173,6	80,4	47,1	19,6	9,8	5,9	—
1Х18Н9	211,8	119,6	67,7	38,2	30,4	15,7	—
1Х18Н9Т	—	181,4	89,2	53,9	37,3	17,6	—
Х18Н11Б	—	148,1	—	53,0	—	19,6	9,8
Х18Н25С2	331,5	78,5	100,0	61,8	30,4	21,6	—
Х23Н18	266,7	138,4	90,2	53,9	51,0	28,4	13,7
Х13Н4Г9	220,6	143,2	69,6	43,1	22,6	13,7	—
Х14Н14В2М	—	—	143,2	70,6	43,1	26,5	—
Х15Н60	286,4	166,7	104,0	58,8	38,2	26,5	—
Х20Н80	436,4	213,8	92,2	71,6	35,3	22,6	—

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ И ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица VI-1

Физические свойства различных технических материалов

Материал	Влажность по массе W , %	Плотность ρ , кг/м ³	Температура t , °C	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)	Теплоемкость c , кДж
					(кг·°C)
Асфальт	0	2120	0—30	0,61—0,74	1,67
Бакелитовый лак	—	1400	—	0,29	—
Бетон с каменным щебнем	8	2000	20	1,28	0,84
Бетон сухой	0	1600	20	0,84	0,84
Железобетон	8	2200	20	1,55	0,84
Шлакобетон	13	1500	20	0,69	0,79
Бумага обыкновенная	Воздушно-сухая	—	20	0,14	1,50
Вата хлопчатобумажная	То же	80	30	0,042	—
Гипс:					
формованный	5	1250	20	0,43	0,84—0,92
обожженный	—	1650	—	0,29	0,84
Глина	15—20	2000—1600	20	0,93—0,69	0,84
Глина огнеупорная	0	1845	430	1,04	1,04
Гравий	Воздушно-сухой	1840	20	0,36	—
Замаска Менделеева	—	950	—	0,13	—
Замша	Воздушно-сухая	340	—	0,053	—
Земля	{ Сухая	1500	—	0,14	—
	{ влажная	1700	—	0,66	2,00
Дерево:					
дуб поперек волокон	6—8	825	0—15	0,19—0,21	2,39
дуб вдоль волокон	6—8	819	12—50	0,35—0,43	2,39
сосна поперек волокон	8	546	0—50	0,14—0,16	2,72
сосна вдоль волокон	8	—	20—25	0,35—0,41	2,72
фанера клеевая	0	600	0	0,15	2,51
Древесный уголь кусковой	Естественной влажности	190	80	0,074	—
Известняк	—	2700	—	0,69—0,93	0,58
Картон	Воздушно-сухой	—	20	0,14—0,35	1,51
Кембрик (лакированный)	—	—	38	0,157	—
Каменный уголь	—	1400	20	0,19	1,31
Кирпич:					
красный машинной формовки	Воздушно-сухой	1800	0	0,77	0,88
ручной	»	1700	0	0,69	0,88
силикатный	»	1900	0	0,81	0,84
Кладка из красного кирпича:					
на холодном растворе	»	1700	0	0,81	0,88
на теплом растворе	»	1600	0	0,67	0,84

Материал	Влажность по массе W , %	Плотность ρ , кг/м ³	Температура t , °C	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)	Теплоемкость c , кДж
					(кг·°C)
Кладка из силикатного кирпича:					
на холодном растворе	Воздушно-сухая	1900	0	0,87	0,84
на теплом растворе	»	1700	0	0,76	0,80
Кладка бутовая из камней средней плотности	»	2000	0	1,28	0,88
Карболит черный	»	1150	50	0,138	—
Кожа	»	—	20	0,14—0,16	—
Кокс порошкообразный	0	449	100	0,19	1,21
Котельная накипь:					
богатая гипсом	0	2000—2700	100	0,69—2,33	—
богатая известью	0	1000—2500	100	0,15—2,33	—
богатая силикатами	0	300—1200	100	0,08—0,23	—
Кварц кристаллический:					
поперек оси	—	—	0	7,2	—
вдоль оси	—	0	0	13,6	—
Ламповая сажа	Воздушно-сухая	165	40	0,069—0,12	—
Лед	—	920	0	2,25	2,26
Льняная ткань	Воздушно-сухая	—	—	0,088	—
Мел	Воздушно-сухой	2000	50	0,93	0,88
Миканит	—	—	20	0,21—0,41	—
Мрамор	—	2800	0	1,30—3,49	0,92
Парафин	—	920	20	0,27	3,35
Пробковые плиты	0	147—198	80	0,04—0,05	1,76
Плексиглас	—	—	20	0,184	—
Песок	{ Сухой Влажный	1500	20	0,33	0,79
		1650	20	1,13	2,09
Резина:					
твердая обыкновенная	—	1200	0—100	0,157—1,161	1,38
мягкая	—	—	20	0,13—0,16	1,38
пористая	Воздушно-сухая	160	—	0,05	—

Материал	Влажность по массе W , %	Плотность ρ , кг/м ³	Температура t , °C	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)	Теплоемкость c , кДж (кг·°C)	
Сахарный песок	Воздушно-сухой	1600	0	0,58	1,26	
Сера ромбическая		930	20	0,14	1,26	
Сланец	Воздушно-сухая	—	21	0,28	0,76	
Слюда (поперек слоев)	Воздушно-сухой	—	94	1,49	—	
Снег	—	1600—3200	20	0,47—0,58	0,88	
Снег	—	200—400	—	0,47	2,09	
Стекло:						
зеркальное	—	2550	0—100	0,78—0,88	0,78	
обыкновенное	—	2500	—	0,74+0,001 t	0,67	
термометрическое	—	2590	20	0,97	—	
пирекс	{	—	0	1,04	—	
		—	400	1,55	—	
		—	2210	—180	0,71	—
		—	—	—100	1,08	—
		—	—	0	1,35	—
		—	—	100	1,42	—
		—	—	200	1,49	—
		—	—	300	1,60	—
кварцевое		—	—	400	1,76	—
		—	—	600	2,08	—
	—	—	800	2,39	—	
	—	—	1000	2,72	—	
	—	—	1200	3,05	—	
молибденовое	—	—	—	0,81+0,001 t	—	
Сукно	0	250	—	0,052	—	
Текстолит	—	1300—1400	20	0,23—0,34	1,47—1,51	
Фарфор	{	2400	95	1,04	1,09	
		2400	1055	1,97	1,09	
Фибра красная	—	1290	20—100	0,47—0,50	—	
Фибролит	0	360—440	80	0,073—0,128	—	
Целлулоид	—	1400	30	0,21	—	
Шелк	—	100	0—93	0,043—0,58	—	
Шерстяная ткань	0	240	—	0,052	—	
Шлак котельный	—	1000	0	0,29	0,75	
Штукатурка:						
известковая	6—8	1600	0	0,69	0,84	
цементно-песчаная	5—6	1800	0	1,163	0,84	
Шлак-бетон в куске	—	2150	—	0,93	0,88	
Эбонит	—	1200	20	0,157—0,174	—	

Насыпная масса (плотность) шихтовых и других материалов

Материал	Насыпная масса (плотность) ρ , кг/м ³
Железные руды:	
магнитный железняк	2500—3500
красный железняк	2000—2800
бурый железняк	1200—2000
Агломерат железной руды	1700—2000
Марганцевая руда	1700—2000
Окалина	1900—2000
Известняк	1400—1700
Шлак:	
сварочный	2000—2200
мартеновский	1600—1800
бессемеровский	1600—1800
гранулированный доменный с содержанием 20—30% влаги	500—700
Стружка стальная дробленая, мелкий чугунный и стальной лом	1800—2200
Скrap крупный, чушковый чугун	2800—3200
Лом:	
железный тяжелый	2500—3100
железный средний	1100—2000
железный легкий	300—1000
железный — трубы	До 1000
Магнезит (порошковый)	2100—2160
Доломит	1680—1740
Кварц	1370—1560
Кокс	450—500
Древесный уголь:	
березовый	170—200
сосновый	120—150
еловый и пихтовый	100—130
Масса 1 м³ металла и шлака	
Жидкий чугун	6800—7000
Жидкий доменный шлак	1800—2200
Жидкая сталь	6900
Жидкий мартеновский шлак	~3000

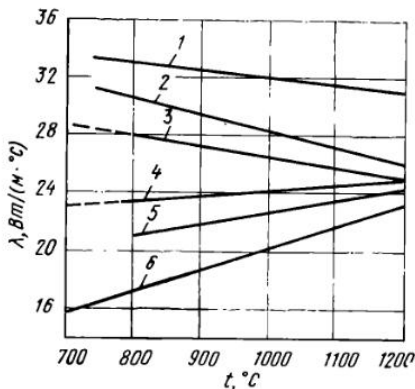


Рис. 34. Зависимость коэффициента теплопроводности λ шихты мартеновской печи от температуры при пористости шихты, %: 1—0; 2—3; 3—5; 4—10; 5—20; 6—46

Таблица VI-3

Средние теплоемкости $c_{ср}$, кДж/(кг·°С) некоторых минералов (от 0 до $t^{\circ}\text{C}$)

$t, ^{\circ}\text{C}$	Свинцовый блеск	Медный блеск	Пиротин	Пирит	Цинковая обманка железистая	Цинковая обманка
100	0,2093	0,5995	0,6979	0,5376	0,5347	0,4744
300	0,2160	0,7076	0,8487	—	0,5401	0,5146
400	0,2177	0,6711	0,7905	—	0,5531	0,5246
500	0,2198	0,6376	0,7746	—	0,5568	0,5275
600	0,2261	0,6192	0,7619	—	0,5819	0,5334
700	—	0,6037	0,7612	—	0,5966	0,5351
800	—	0,5832	0,7369	—	0,5673	0,5359
900	—	0,5744	0,7356	—	0,5878	0,5279
1000	—	0,5748	0,7369	—	—	—
1100	—	0,5732	0,7423	—	—	—
1200	—	—	0,9278	—	—	—

Таблица VI-4

Теплофизические свойства графита

Характеристики	Направление потока	Температура, $^{\circ}\text{C}$				
		20	200	400	600	800
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С) графита:						
кристаллический		354,7	308,2	—	—	—
естественный	⊥	195,4	144,2	112,8	91,9	75,6
прессованный		157	118,6	93,0	69,8	63,9
искусственный, с $\rho=1,76$ г/см ³	⊥	104,7	81,4	69,8	58,2	—
то же, с $\rho=1,55$ г/см ³		130,3	102,3	79,1	63,9	53,5
Сопротивление разрыву $\sigma_{п.ц}$, МН/м ²		14,2	15,2	15,9	16,5	17,6
	⊥	10,3	11,3	12,0	12,5	13,7
Модуль упругости E , МН/м ²		5880	7100	7350	7500	7840
	⊥	2700	3040	3200	3630	3920
Теплоемкость c , кДж/(м·°С)	—	0,71	1,17	1,47	1,68	1,88
Электросопротивление $\rho_{э} \cdot 10^4$, Ом·см	—	16	13	11	10	9
Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$, 1/°С		7,2*1	8,5*2	10,0*3	13,0*4	—
	⊥	4,0*1	5,5*2	6,8*3	9,3*4	—
		1,8*1	1,55*2	1,45*3	1,40*4	—

Примечание. Величины $\sigma_{п.ц}$, E , c , ρ , β приведены для графита с объемной массой $\rho=1,7$ г/см³.

*1 При 0—500°С. *2 При 0—1000°С. *3 При 0—1500°С. *4 При 0—2000°С.

Свойства измельченного графита при 20°C в зависимости от ситового состава изменяются следующим образом:

Свойства	Размер сита, $\text{отв}/\text{см}^2$			
	3	6	16	(сажа сухая)
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	700	480	420	165
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	1,20	0,384	0,186	0,07

Температура плавления графита $t_{\text{пл}} \approx 3500^\circ\text{C}$, температура кипения $t_{\text{кип}} = 4200\text{--}5000^\circ\text{C}$ при давлении свыше $100 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^2$.

Плотность графита при 20°C $\rho = 1,55\text{--}2,23 \text{ г}/\text{см}^3$; определенная рентгенографически $\rho = 2,27 \pm 0,01$; для естественных графитов ρ достигает 2,2; для пресованных 1,5 $\text{г}/\text{см}^3$ и более.

Модуль сдвига 18000 $\text{МН}/\text{м}^2$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$; твердость по Моосу для естественных пород 9 единиц, для искусственных 3—3,5. Предел прочности на сжатие 400 $\text{МН}/\text{м}^2$.

Теплопроводность графита после нейтронного облучения может уменьшиться в 50 раз. Например, после облучения при 10^{14} нейтр/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ в течение 1000 ч теплопроводность графита при 30°C уменьшилась от 190 до 3,7 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

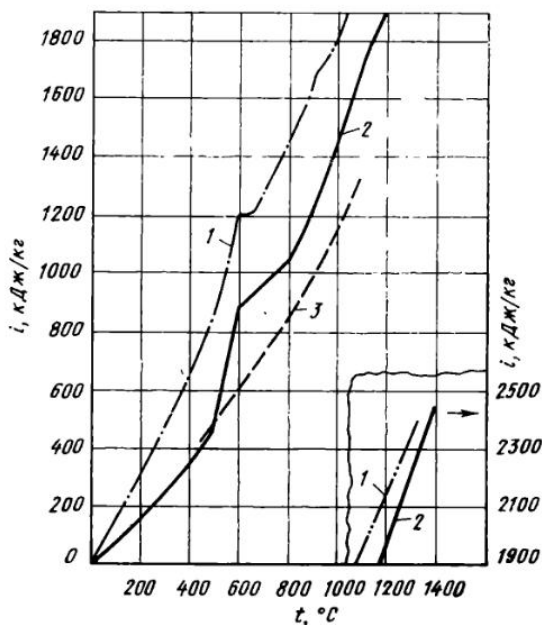


Рис. 35. Зависимость удельной энтальпии i керамических материалов от температуры: 1 — огнеупорная масса; 2 — шамот; 3 — кварц

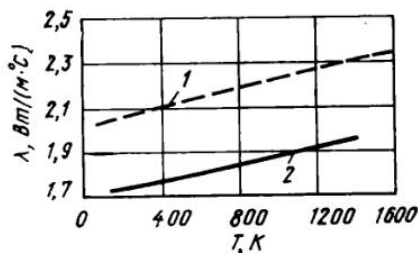


Рис. 36. Зависимость коэффициента теплопроводности λ двуокиси циркония (пористость 20%) от температуры: 1 — плавленная, кристаллическая; 2 — спеченная, пористая

Таблица VI-5

Теплофизические свойства спеченных и плавленых оксидов некоторых материалов

Материал	Плотность, ρ , г/см ³	Пористость, %	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С) при температуре, °С								Темпера- тура плавления, °С	Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^4$, 1/°С (от 30 до 1000°С)	
			при температуре, °С										
			100	200	400	600	800	1000	1200	1400			1600
Al ₂ O ₃	3,69—3,77	{ 4,5—7,3 0 }	28,90 30,4	21,34 22,6	12,6 12,7	8,69 9,13	6,86 7,19	5,86 6,15	5,28 5,52	5,23 5,49	5,79 6,07	(7,26) (7,57)	8,8 —
CaO	3,03	{ 8,75 0 }	13,9 15,2	10,14 11,11	8,4 9,16	7,57 8,286	7,28 7,99	7,12 7,78	— —	— —	— —	— —	9,7 —
Mg ₂ SiO ₄	2,22	{ 31,1 0 }	3,681 5,379	3,099 4,52	2,471 3,553	2,053 2,98	1,843 2,681	1,67 2,436	1,634 2,967	(1,59) (2,309)	— —	— —	10,2 —
MgO	3,29—3,48	{ 2,8—8,1 0 }	34,4 35,9	27,04 28,26	15,76 16,7	11,03 11,54	8,12 8,51	6,69 6,995	5,832 6,12	5,78 6,02	6,57 6,86	9,05 (9,49)	13,5 —
Al ₆ Si ₂ O ₁₃	2,79	{ 11,04 0 }	5,39 6,12	4,91 5,54	4,2 4,73	3,80 4,31	3,59 4,07	3,51 3,98	3,43 3,87	(3,43) (3,873)	— —	— —	5,3 —
Al ₆ Si ₂ O ₁₃	2,21	{ 29,8 0 }	(4,06) (5,79)	3,59 5,15	3,099 4,396	2,85 4,06	2,72 3,89	2,681 3,83	2,681 3,826	(2,681) (3,826)	— —	— —	5,9 —
MgAl ₂ O ₄	3,27	{ 7,65 0 }	13,8 14,95	11,96 12,9	9,44 10,22	7,49 8,12	6,15 6,65	5,36 5,78	5,02 5,44	— —	— —	— —	7,6 —
NiO	5,05	{ 25,7 0 }	9,21 12,39	7,39 9,94	5,31 7,15	4,19 5,69	3,43 4,61	3,14 4,48	— —	— —	— —	— —	8,7 —

Материал	Плотность, ρ г/см ³	Пористость, %	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С								Температура плавления, °С	Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$, 1/°С (от 30 до 1000°С)	
			Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С										
			100	200	400	600	800	1000	1200	1400			1600
BeO	2,7—2,86	{ 4,67—9,93 0	166,3 174,5	88,5 93,04	44,78 46,99	25,7 26,98	19,31 20,24	16,39 17,21	15,58 16,39	14,54 15,12	(14,77) (15,93)	—	—
UO ₂	8,0 10,8	{ 26,7 0	5,94 7,95	4,32 5,78	3,309 4,42	2,762 3,704	2,553 3,408	—	—	—	—	2175	6,1
TiO ₂	4,11	{ 3,5 0	6,28 6,53	3,77 3,92	3,472 3,617	3,27 3,38	3,181 3,309	3,181 3,309	—	—	—	1560	7,4
ThO ₂	8,07	{ 16,75 0	7,02 8,55	4,98 5,99	3,64 4,355	2,85 3,408	2,553 3,059	2,09 2,512	(2,053) (2,454)	—	—	2800	9,2
ZnO	3,72	{ 34,0 0	(11,32) (47,15)	7,41 11,22	4,605 6,99	3,599 5,47	—	—	—	—	—	—	—
ZrSiO ₄	3,69	{ 18,6 0	4,61 5,69	4,19 5,19	3,77 4,64	3,475 4,31	3,309 4,105	3,181 3,937	3,099 3,832	—	—	—	4,2
ZrO ₂	5,22—5,35	{ 12,3—14,4 0	1,65 1,95	1,759 2,053	1,80 2,099	1,88 2,202	1,969 2,29	2,053 2,396	2,09 2,44	—	—	2700 (2950)	10,0
PbO ₂	10,4	—	4,19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Величины в скобках получены экстраполированием. 2. Коэффициент теплопроводности спеченных оксидов металлов также зависит от исходных порошков, степени прессования и режимов спекания. Для порошков двуокиси урана $\rho = 3,6 \div 4,6$ г/см³; $\lambda_{80} = 0,147$; $\lambda_{100} = 0,142$; $\lambda_{200} = 0,141$; β_T (мг·°С); $c = 0,259$ кДж/(кг·°С).

Таблица VI-6

Истинные c и средние c_{cp} , кДж/(кг·°С), теплоемкости окислов — основных компонентов огнеупорных материалов и шлаков в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	SiO_2		Al_2O_3		Fe_2O_3		FeO		MgO		MnO		CaO	
	c	c_{cp}	c	c_{cp}	c	c_{cp}	c	c_{cp}	c	c_{cp}	c	c_{cp}	c	c_{cp}
0	0,669	0,669	0,720	0,720	0,615	0,615	0,699	0,699	0,817	0,871	0,762	0,762	0,737	0,737
100	0,795	0,783	0,925	0,837	0,724	0,674	0,737	0,720	1,017	0,955	0,825	0,787	0,821	0,783
200	0,963	0,849	1,026	0,909	0,799	0,720	0,758	0,733	1,089	1,005	0,879	0,812	0,858	0,812
300	1,026	0,900	1,089	0,959	0,854	0,754	0,766	0,745	1,135	1,043	0,929	0,833	0,883	0,833
400	1,068	0,938	1,130	0,996	0,904	0,787	0,783	0,754	1,164	1,068	0,976	0,858	0,896	0,846
500	1,105	0,967	1,164	1,026	0,955	0,816	0,795	0,758	1,189	1,089	1,013	0,879	0,909	0,858
600	1,135	0,992	1,193	1,051	1,000	0,842	0,808	0,766	1,206	1,109	1,047	0,900	0,921	0,867
700	1,159	1,013	1,218	1,076	1,047	0,867	0,816	0,775	1,227	1,122	1,076	0,917	0,929	0,875
800	1,189	1,034	1,239	1,093	1,093	0,892	0,825	0,779	1,243	1,139	1,097	0,934	0,938	0,883
900	1,209	1,051	1,260	1,109	—	—	0,837	0,783	1,256	1,151	1,114	0,946	0,946	0,892
1000	1,235	1,072	1,281	1,126	—	—	—	—	1,273	1,159	1,126	0,959	0,950	0,896
1100	1,256	1,084	1,302	1,143	—	—	—	—	1,285	1,172	—	—	0,959	0,900
1200	1,281	1,101	1,323	1,156	—	—	—	—	1,302	1,181	—	—	0,963	0,909
1300	1,302	1,114	1,339	1,168	—	—	—	—	1,315	1,193	—	—	0,971	0,913
1400	1,323	1,130	1,361	1,181	—	—	—	—	1,327	1,202	—	—	0,979	0,917
1500	1,344	1,143	1,378	1,193	—	—	—	—	1,339	1,209	—	—	0,984	0,921

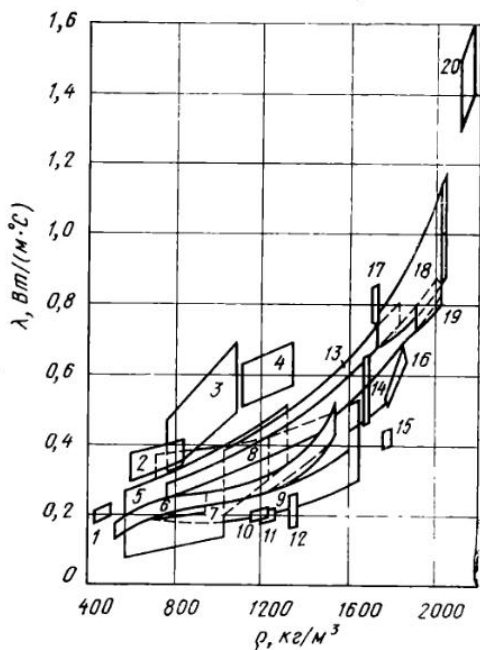


Рис. 37. Зависимость коэффициента теплопроводности λ от плотности ρ , по опытным данным для некоторых строительных материалов: 1 — асбогермит; 2 — асбозурит; 3 — азродолонит; 4 — известняк параллельно слоям; 5 — трепельный кирпич; 6 — теплый раствор; 7 — глино-торфяной кирпич; 8 — глиногилс; 9 — теплый бетон; 10 — алебастровый кирпич; 11 — асбестовая штукатурка; 12 — кирпич из обожженной глины; 13 — ракушечник; 14 — чистая глина; 15 — болотная руда; 16 — красный кирпич; 17 — силикатный кирпич; 18 — известняк; 19 — кислотоупорный кирпич; 20 — песчаник

Таблица VI-7

Средние значения теплоемкости $c_{ср}$ огнеупорных и нерудных материалов

Материал	Температура, °C	$c_{ср}$	Материал	Температура, °C	$c_{ср}$	
		Дж (кг·°C)			Дж (кг·°C)	
Базальт	17—100	0,858	Мусковит	20—98	0,842	
	20—767	1,089	Опал	12—100	0,992	
	750—880	2,621	Ортоклаз	15—99	0,787	
Гипс	17—100	1,072	Песчаник	15—100	0,729	
Гранит	0—100	0,795	Тальк	200—205	1,256	
Графит	0—18	0,561	Углеродистый кирпич	24—68	0,854	
	100	0,837		700	0,862	
	0—2000	1,989		800	0,883	
Диатомовая земля	17—100	0,888		Хромистый железняк	900	0,896
	Доломит	17—100			0,804	1000
		Известняк	0—100		0,904	1200
Кальцит	17	0,791	Хромитовый кирпич	1400	0,946	
	17—100	0,837	Окись хрома	—	0,833	
Карборунд	0	0,586	Циркон	21—52	0,754	
	300	1,093	Цирконовый кирпич	15—100	0,611	
	600	1,151		25—600	0,574	
Кварцевое стекло	15—100	0,779	25—1000	0,657		
Корунд (зернистый)	0,98	0,829	25—1200	0,699		
	20—2030	1,168	25—1400	0,733		
Магнезит (порода)	—	0,950	Окись циркония	0—100	0,452	
Магнезит спекшийся (кусковой)	—	0,979	Шпинель благородная	15—47	0,812	
Мрамор	0—100	0,904				

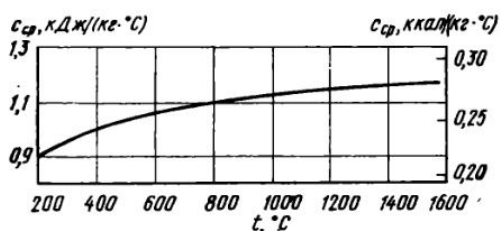
Рис. 38. Зависимость от температуры средней теплоемкости $c_{ср}$ для Al_2O_3

Рис. 39. Зависимость теплоемкости c шлаков углей (1) и сланцев (2) от температуры t

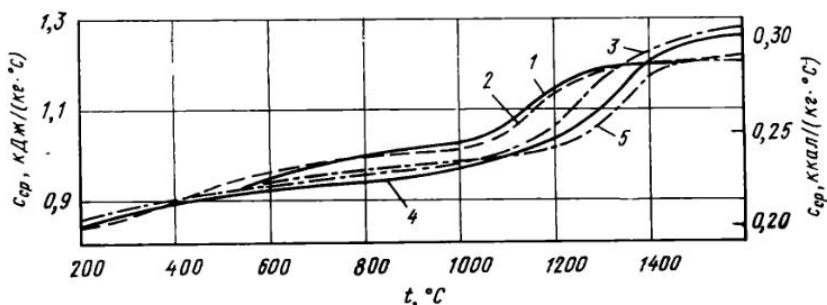
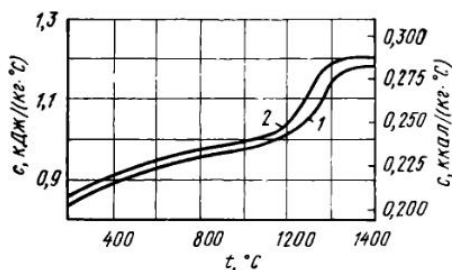


Рис. 40. Зависимость средней теплоемкости $c_{\text{ср}}$ шлаков с большим содержанием CaO от температуры t :

1 — сланец каширский; 2 — сланец савельевский; 3 — доменный шлак (39% CaO); 4 — доменный шлак (50% CaO); 5 — сланец эстонский

Химический состав шлаков из различных сланцев

Сланцы	Химический состав шлаков, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃
Савельевский	45,7	11,6	11,6	—	18,9	2,00	10,0
Каширский	35,5	8,4	10,8	—	28,6	1,0	15,6
Эстонский	31,3	8,5	6,4	—	41,3	5,1	6,1

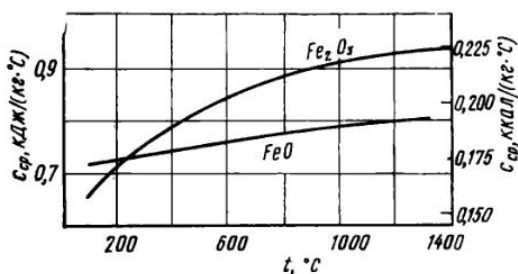


Рис. 41. Зависимость средней теплоемкости $c_{\text{ср}}$ для FeO и Fe₂O₃ от температуры t

КЛАССИФИКАЦИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Для всех видов огнеупорных изделий по ГОСТ 4385—68, за исключением легковесных (теплоизоляционных), устанавливают основные признаки их классификации (технической). Огнеупорные изделия подразделяют на следующие типы и группы.

А. В зависимости от химико-минералогического состава:

Таблица VI-8

Химико-минералогический состав огнеупорных изделий

Огнеупоры	Определяющий химический компонент (на прокаленное вещество)	
	обозначение	содержание, %
Кремнеземистые:		
кварцевое стекло	SiO ₂	>99
динасовые (тридимитокристаллитовые) на известковой связке	SiO ₂	>93
то же, на различных связках и с разными добавками	SiO ₂	>80
Алюмосиликатные (низко-, средне- и высокоглиноземистые):		
полукислые	Al ₂ O ₃	>28
шамотные	SiO ₂	65—85
муллитокремнеземистые	Al ₂ O ₃	28—45
муллитовые	Al ₂ O ₃	45—62
муллитокорундовые	Al ₂ O ₃	62—72
корундовые	Al ₂ O ₃	72—90
Магнезиальные:		
магнезитовые (периклазовые)	MgO	>90
то же, на различных связках	MgO	>80
Магнезиально-известковые:		
магнезитодоломитовые (периклазоизвестковые)	MgO	>50
	CaO	>10
доломитовые (известковопериклазовые)	MgO	35—50
	CaO	45—70
то же, стабилизированные (периклазоалитовые)	MgO	35—65
	SiO ₂	6—15
	CaO	15—40
	CaO : SiO ₂	2,7—2,9
известковые	CaO	>70
Магнезиально-шпинелидные:		
магнезитохромитовые (периклазохромитовые)	MgO	>60
	Cr ₂ O ₃	5—18
хромомagneзитовые (хромитопериклазовые)	MgO	40—60
	Cr ₂ O ₃	15—30
хромитовые	MgO	<40
	Cr ₂ O ₃	>25
периклазошпинельные	MgO	40—80
	Al ₂ O ₃	15—55
шпинельные	MgO	25—40
	Al ₂ O ₃	55—70
Магнезиально-силикатные:		
периклазофорстеритовые	MgO	65—80
	SiO ₂	>10
форстеритовые	MgO	50—65
	SiO ₂	25—35
форстеритохромитовые	MgO	45—60
	SiO ₂	20—30
	Cr ₂ O ₃	5—15
Углеродистые:		
углеродистые графитированные	C	>98
углеродистые неграфитированные	C	>85
углеродсодержащие	C	5—70

Огнеупоры	Определяющий химический компонент (на прокаленное вещество)	
	обозначение	содержание, %
Карбидкремниевые:		
карбидкремниевые рекристаллизованные	SiC	>90
карбидкремниевые на различных связках	SiC	>70
карбидкремнийсодержащие	SiC	20—70
Цирконистые:		
циркониевые (бадделитовые)	ZrO ₂	>90
бадделитокорундовые	ZrO ₂	>30
	Al ₂ O ₃	<65
цирконовые на различных связках с различными добавками	ZrO ₂	>35
	SiO ₂	>18
Окисные:		
изделия из оксидов (BeO, MgO, CaO, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , TiO ₂ , UO ₂ и др.)	—	Максимально высокое содержание определяющего оксида
Некислородные:		
изделия из нитридов, боридов, карбидов (кроме SiC), силицидов и других некислородных соединений	—	Максимально высокое содержание некислородных соединений

Б. По степени огнеупорности:

- а) огнеупорные: 1580—1770°C (в пироскопах керамических ПК 158—ПК 177);
 б) высокоогнеупорные: от 1771 до 2000°C (ПК 177—ПК 200);
 в) высшей огнеупорности: >2000°C (свыше ПК 200).

В. В зависимости от пористости:

- с открытой пористостью:
 особоплотные, ≤3%;
 высокоплотные, 3—10%;
 плотные, 10—16%;
 уплотненные, 16—20%;
 обычные, I подгруппы, 20—24%; II подгруппы, 24—30%;
 с общей пористостью:
 легковесные с общей пористостью, 45—85%;
 ультралегковесные, ≥85%.

Г. По способу изготовления:

1) изделия пластичноформованные, изготовленные из масс в пластичном состоянии методом машинной формовки или прессованием на механических или других прессах и различными методами ручного формования;

2) сухоформованные неармированные и армированные, изготовленные из полусухих или сухих порошкообразных малопластичных или непластичных масс (в том числе из бетонов, плавящихся материалов и

т. п.) методами механического, гидравлического или гидростатического прессования, вибропрессования, вибрирования, трамбования и т. п.;

3) шликернолитые, изготовленные литьем из жидкого шликера, пеношликера, газошликера, термопластичного шликера и т. п.;

4) термопластичнопрессованные, изготовленные методом прессования из масс с применением термопластичных добавок (парафина, воска и др.);

5) горячепрессованные, изготовленные горячим прессованием из нагретых до термопластичного состояния огнеупорных масс;

6) изделия плавнелитые, изготовленные литьем из расплава (электроплавкой, термитной плавкой и т. п.);

7) изготовленные методом механической обработки (резанием, шлифованием и др.) из естественных горных пород или плавленых блоков.

Д. В зависимости от термической обработки:

1) обожженные;

2) безобжиговые (включая армированные), подвергнутые сушке, а в ряде случаев нагреву до 250—400°C;

3) горячепрессованные, подвергнутые отжигу после прессования;

4) плавнелитые, подвергнутые отжигу после отливки.

Е. По форме и размерам:

1) нормальный кирпич (большого и малого формата), «прямой» и «клиновой» (продольный и поперечный);

2) фасонные (простые, сложные, особо сложные);

3) фасонные крупноблочные изделия массой свыше 60 кг (простые, сложные, особо сложные);

4) специальные изделия промышленного и лабораторного назначения (тигли, трубки и т. п.).

МАРКИРОВКА ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

На огнеупорных изделиях в соответствии с ГОСТ 1502—42 и 4873—71 наносят следующие условные обозначения:

а) завода-изготовителя;

б) марки изделий в соответствии с назначением изделий (на изделиях нормальных размеров и формы марки не обозначаются).

Для следующих огнеупоров введено также обозначение рода или вида изделий:

Полукислые:	
на каолиновой связке	ПК
на глинистой связке	ПГ
на связке из каолина или глины	
рядовых свойств	ПР
Андалузитовые	АД
Шамотно-андалузитовые	ША
Хромо-магнезитовые	ХМ
Талько-магнезитовые	ТМ
Хромитовые	Х
Карборундовые	К
Шамотные	Ш
Шамотные легковесные	ШЛ
Полукислые	П
Динасовые	Дн

Огнеупорные изделия, выпускаемые без обжига (безобжиговые), после обозначения марки должны иметь дополнительно знак «БС».

СВОЙСТВА ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Таблица VI-9

Химический состав некоторых огнеупорных изделий, %

Изделия	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (FeO)	Cr ₂ O ₃	CaO	MgO	Щелочи	ZrO ₂	C	SiC	Примеси других окислов
Динасовые	95—96	Следы	1—2	0,5—1,0	—	1,3—2,5	≤0,1	≤0,8	—	—	—	—
Карборундовые	4—30	—	0,2—20	0,5—2	—	0,5—2	0,5	Следы	—	—	93—50	—
Алюмосиликатные (бок- ситовые и диаспоровые)	14—42	2—4	80—50	1—5	—	≤1,5	—	≤3	—	—	—	—
Шамотные	48—65	1—3	46—30	0,5—3,5	—	0,2—1,5	0,2—1,0	0,1—3,5	—	—	—	—
Магнезитовые	0,5—3,5	—	0,5—2,0	0,2—8,0	—	0,2—8,0	95—86	0,5—3	—	—	—	—
Форстеритовые (оливи- новые)	30—40	До 0,5	1,2—2,1	7—9	До 0,7	≤0,7	60—50	Следы	—	—	—	—
Хромитовые	4—9	—	8—18	10—20	30—58	≤0,5	23—18	—	—	—	—	—
Хромомагнезитовые	4—8	—	8—13	8—13	20—35	0,5—2,5	52—30	—	—	—	—	—
Графитовые	13—45	—	6—30	≤1,5	—	Следы	Следы	—	—	80—25	—	—
Коксовые	—	—	—	—	—	—	—	—	98—80	95—90	—	10—5
Цирконовые	0,5—15	≤1,5	≤3	≤5	—	—	—	—	—	—	—	—
Циркониевые	30—35	—	≤3	≤3	—	≤3	≤1	—	55—66	—	—	—
Корундовые	0,5—45,0	≤3	99—50	0,5—4	—	—	—	—	—	—	—	—
Плавленые муллитовые	16—20	≤5	73—70	0,3—2,0	—	≤2,0	—	≤2,0	—	—	—	—
Силлиманитовые	30—46	≤1,5	66—50	≤2,5	—	≤0,5	≤0,5	≤2	—	—	—	—

Таблица VI-10

Теплофизические свойства огнеупорных изделий и материалов

Наименование огнеупора	Плотность ρ , г/см ³		Теплоемкость, c , кДж/(кг \times X °C)	Коэффициент теплопро- водности λ , Вт/(м \cdot °C)	Удельное электросопротивление ρ_3 , Ом \cdot см, при температуре, °C		
	с порами	без пор			800	1200	1600
Графитовые изделия	1,6	2,2	0,837	162,8—40,7 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	—	—	—
Динасовый кирпич	1,9—1,93	2,38—2,5	0,837 + 0,25 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	0,93 + 0,69 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	200	—	1,5
Карбондовые изделия (карбо- фракс)	2,3—2,6	3,1—3,2	0,96 + 0,147 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	20,9—10,5 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	800	40	0—0,8
Корундовые (алундовые) изделия	2,6—2,9	3,7—3,9	0,79 + 0,42 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	2,1 + 1,9 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	1000	100	5,2—4,0
Рекристаллизованный корунд	3,75—3,85	3,8—3,9	—	29,1*2, 5,8*2	—	—	—
Магнезитовый кирпич	2,6—2,8	3,0—3,2	1,05 + 0,29 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	4,7—1,7 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	1000	100—200	—
Изделия из плавяного муллита	2,1—2,4	3,0—3,3	1,05 + 0,25 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	—	—	—	—
Плавленый магнезитовый кирпич	2,7—2,8	3,5—3,6	—	—	4000	100—200	1,0—2,0
Оксид бериллия	—	3,0	0,13 + 0,52 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	1,9—3,7*3	—	10 ⁹	—
Оксид тория	—	10,0	0,25*1	Очень низкий	—	10 ⁷	—
Полукислый огнеупорный кирпич	1,85—1,95	2,5—2,6	—0,88 + 0,23 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	0,87 + 0,52 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	—	4—6	—
Строительный (красный) кирпич	1,4—1,6	2,5—2,6	0,92	0,81 + 0,47 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	—	—	—
Силлиманитовые и муллитовые изде- лия	2,2—2,4	2,8—3,0	0,84 + 0,25 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	1,69—0,23 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	180	11,5	3,5
Угольные изделия	1,35—1,5	1,8—2,1	0,837	23,3 \pm 34,9 \cdot 10 ⁻³ t_{cp} *4 До 1000°C	—	—	—
Хромитовый кирпич	3,0—3,2	3,8—4,2	0,84 + 0,29 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	1,28 + 0,41 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	3,0	0,5—0,1	0,05—0,01
Хромомagneзитовый кирпич	2,8—2,9	3,7—3,8	—	1,9—2,1*6	—	—	—
Термостойкий хромомагнезитовый кирпич	2,75—2,85	3,6—3,8	—	4,1—1,11 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	—	—	—
Циркониевые изделия	3,3	4,5—5,0	0,54 + 0,13 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	1,3—0,64 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	1000—10000	10,0	—
Цирконовые изделия	3,2—3,3	4,0—4,5	0,63 + 0,13 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	—	—	10,0	—
Шамотный кирпич	1,8—1,9	2,54—2,62	0,88 + 0,23 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	0,84 + 0,58 \cdot 10 ⁻³ t_{cp}	7—15	1,0—1,5	0,6

*1 При 25°C. *2 При 100°C. *3 При 20°C. *4 До 1000°C. *5 От 0 до 70°C.

Таблица VI-11

Основные свойства некоторых огнеупоров

Изделия	Плотность, г/см ³		Огнеупорность, °С	Допустимая температура, °С	Предел прочности при сжатии, МН/м ² , до	Температура начала деформации под нагрузкой 0,196 МН/м ² , °С
	с учетом пористости	без учета пористости				
Бокситовые	2,0—2,35	—	1780—1950	—	39,2—68,6	1500—1600
Графитовые	1,6	2,2	2000	2000	19,6—29,4	1900
Коксовые	1,35—1,6	—	2500	—	14,7—34,3	1900
Талько-магнезитовые	—	2,85	1540—1560	—	29,4—39,2	1500
Форстеритовые	2,3—2,5	—	1860—1920	—	9,8—24,5	1550—1570
Хромитовые	2,8—3,3	—	1850—2050	1650—1700	24,5—49,0	1300—1500
Циркониевые	—	—	2500	2000	98—196	1550—1600
Цирконовые	2,1—2,2	—	2000—2500	1900	14,7—39,2	1550—1650
Из окиси бериллия	—	—	2600	2000	—	—
Из окиси тория	—	—	3000—3100	2500	—	—

Таблица VI-12

Физические свойства шамотного (ГОСТ 390—69) и полукислого (ГОСТ 4873—71) кирпича

Класс	Огнеупорность, °С	Предел прочности при сжатии, МН/м ²		Дополнительная усадка, %	Открытая пористость (кажущаяся), %		Допустимая максимальная температура кладки, °С
		I подгруппа	II подгруппа		I подгруппа	II подгруппа	
ГОСТ 390—69							
ША	≥1730	≥19,6	≥14,7	≤0,7*1	≤24	≤30	1300—1400
ШБ	≥1670	≥19,6	≥12,7	≤0,7*2	≤24	≤30	1250—1300
ШВ	≥1580	—	≥12,2	≤0,7*3	—	—	1200—1250
ШУС	≥1580	—	≥12,2	≤0,7*3	—	Не нормируется	—
ГОСТ 4873—71							
ПА	≥1710	—	≥12,2	≤0,5*1	—	—	—
ПБ	≥1670	—	≥14,7	≤0,5*2	≤24	≤30	—
ПВ	≥1580	—	≥9,8	≤0,8*3	—	Не нормируется	—

*1 При 1400°С. *2 При 1350°С. *3 При 1250°С.

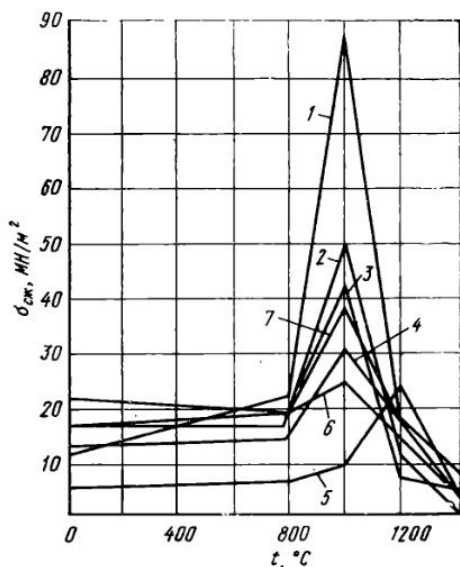
Рис. 42. Зависимость механической прочности $\sigma_{сж}$ шамотных огнеупоров от температуры при различном содержании Al_2O_3 , %:
1 — 23,7; 2 — 31,6; 3 — 26,3; 4 — 37,2; 5 — 43,0;
6 — 42,4; 7 — 16,4

Таблица VI-13

Физико-химические свойства динаса различного назначения

Показатели	Динас для коксовых печей	Динас для мартеновских печей				Динас для электроплавильных печей (электродинас)
		особого назначения	класс		высокремнеземистый высокоплотный для сводов	
			I	II		
Содержание SiO ₂ , %	>94	>94,5	>94,5	>93,0	>97	>96
Содержание Al ₂ O ₃ , %	Не нормируется	≤1,5	≤1,5	Не нормируется	—	≤1,5
Содержание CaO, %	То же	≤2,8	Не нормируется			≤1,7
Огнеупорность, °С	>1700	>1710	>1710	>1690	Не нормируется	>1720
Температура начала деформации под нагрузкой 0,196 МН/м ² (2 кгс/см ²), °С	>1650	>1660	>1650	>1620	То же	>1660
Плотность, г/см ³ (без учета пористости)	≤2,37	≤2,36	≤2,38	≤2,4*1	≤2,38	≤2,34
Дополнительный рост при температуре 1450°С, %	≤0,4	—	—	—	—	—
Пористость кажущаяся, %:	—	23	23	25	14	22*3
для подового кирпича	≤16	—	—	—	—	—
для головочного и стенового кирпича	≤23	—	—	—	—	—
для прочего кирпича	Не нормируется	—	—	—	—	—
Предел прочности при сжатии, МН/м ² :	—	≥22,0	≥19,6	≥17,1	≥49,0	≥24,5
для подового кирпича	49,0	—	—	14,7*2	44,0*2	19,6*2
для головочного и стенового кирпича зон вертикалов и перекрытия вертикалов, истираемого коксом	29,4	—	—	—	—	—
для остального кирпича	19,6	—	—	—	—	—

*1 Для одного из трех образцов допускается 2,42. *2 Для одного из трех образцов допускается не менее указанного. *3 Для отдельных образцов не более 24.

Свойства алюмосиликатных огнеупоров различных заводов

Показатели	Шамотный доменный 1 класса (семилукский)	Каолиновый ковшевой (часов-ярский)	Высокоглино- земистый с содержанием Al_2O_3 60% (семилук- ский)
Химический состав, %:			
Al_2O_3	39,01	39,55	66,77
TiO_2	1,89	1,49	—
Fe_2O_3	1,23		0,9
SiO_2	55,53	—	—
Огнеупорность, °С	1720	1750	>1800
Плотность (без учета пористости), г/см ³	2,665	2,676	3,026
Плотность (с учетом пористости), г/см ³	2,163	2,18	2,42
Пористость кажущаяся, %	16,2	16,4	19,0
Пористость истинная, %	20,0	19,0	21,0
Предел прочности при сжатии, МН/м ² , при температуре, °С:			
20	55,7	54,6	73,1
500	32,0	51,0	50,1
800	42,6	53,1	48,0
Термическая стойкость, число водяных тепло- смен:			
до появления трещин	1	1	4—27
до потери 20% массы	24	26	—
Без потерь	—	—	25—68
Дополнительная усадка (—) или рост (+), %, при 1400°С и выдержке, ч:			
2	—0,1	—0,2	—0,0
4	—0,2	—0,4	—0,0
8	—0,3	—0,5	—0,0
То же, при 1500°С и выдержке, ч:			
2	+0,7	—1,6	0,0
4	+0,5	—2,6	—0,1
8	+0,5	—3,0	+0,1
То же, при 1600°С и выдержке, ч:			
2	—	—2,5	—0,5
4	—	—2,0	—0,8
8	—	—2,5	—0,6
Температура начала деформации, °С, под на- грузкой, МН/м ² :			
0,196	1400	1480	1580
0,392	1330	1460	1520
0,49	1280	1450	1520
Деформация под нагрузкой 0,196 МН/м ² , %:			
при температуре, °С	11,4	12,1	21,0
при выдержке, ч	1330	1480	1570
	10	9	11
Деформация под нагрузкой 0,392 МН/м ² , %:	9,4	19,5	—
То же:			
при температуре, °С	1400	1460	—
при выдержке, ч	11	11	—

Т а б л и ц а VI-15

Физико-химические свойства высокоглиноземистых издстлий

Показатели	Содержание глинозема, %							
	<45	<55	<62	<74	<75	<62	<62	<80
для воздушнонагревателей больших объемных доменных печей	для высоконагревателей больших объемных доменных печей	для воздушнонагревателей доменных печей	для печей трубосборочного стана	для футеровки кессонов мартеновских печей	для футеровки краевой зоны трубчатых печей прямого восстановления железа	для издстлий типа селлиманитовых	для издстлий типа корундо-муллитовых	<80
Содержание $Al_2O_3 + TiO_2$, %	>45	>55	>62	>74	>75	>62	>62	<80
Содержание Fe_2O_3 , %	<1,5	<2	<1,5	—	—	>1,5	>1,5	<1,5
Огнеупорность, °С	>1760	>1780	>1800	>1830	>1830	>1800	>1800	>1850
Температура начала деформации под нагрузкой 0,196 МН/м ² , °С	1400	1400	—	1530	1500	—	—	—
Дополнительная усадка, %	<0,2**	<0,7**	<1,2**	<0,7**	<0,3**	<1,0**	<1,0**	<1,0**
Пористость кажущаяся, %	>16	>24	>24	>12	>18	—	—	>23
Предел прочности при сжатии, МН/м ²	<58,8	<19,6	<39,2	<38,4	<38,4	<34,3	<14,7	<34,3
Термостойкость, число тепловых циклов	—	Не нормируется	15	—	—	—	—	—

*1. Под нагрузкой 0,392 МН/м². ** При 1400°С. ** При 1500°С. ** При 1550°С. ** При 1600°С.

Т а б л и ц а VI-16

Средняя теплоспособность огнеупорных материалов $C_{ср}$, кДж/(кг·°С), в интервале температур от 0 до t , °С

Температура, °С	Температура, °С								
	Шамот	Дниас	Корунд	Магнезит	Температура, °С	Шамот	Дниас	Корунд	Магнезит
50	0,825	0,737	—	0,979	0,988	0,979	0,988	1,139	1,147
100	0,837	0,779	0,849	0,986	1,017	0,986	1,017	1,151	1,156
150	0,854	0,816	—	1,013	1,043	1,013	1,043	1,168	1,164
200	0,871	0,849	0,883	1,026	1,063	1,026	1,063	1,185	1,172
250	0,888	0,879	—	1,043	1,080	1,043	1,080	1,202	1,176
300	0,907	0,909	0,934	1,059	1,097	1,059	1,097	1,214	1,185
350	0,917	0,929	0,925	1,076	1,109	1,076	1,109	1,231	1,189
400	0,934	0,950	0,925	1,089	1,122	1,089	1,122	1,248	1,193
450	0,950	0,967	—	1,105	1,130	1,105	1,130	1,264	—
500	0,963	0,980	1,038	1,122	1,139	1,122	1,139	1,277	—

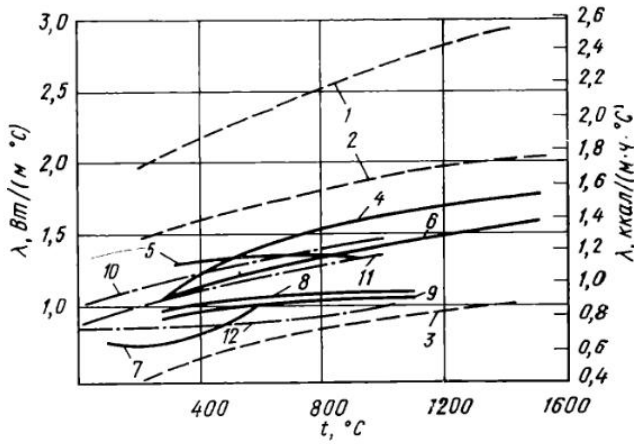


Рис. 43. Зависимости коэффициента теплопроводности λ от температуры t для огнеупорных материалов:

Номер кривой	Плотность ρ , г/см ³	Пористость, %	Температура обжига, °C
Каолиновый кирпич			
1	2,36	11	1575
2	2,10	22	1575
3	1,27	49	1575
Шамотный кирпич			
4	2,15	19	—
5	1,94	19	1310
6	1,90	27	—
7	1,86	32	—
8	1,85	29	1410
9	1,84	30	1470
Глинистый кирпич			
10	2,15	5	1250
Шиферный кирпич			
11	1,81	31	—
Миасский кирпич			
12	1,75	39	—

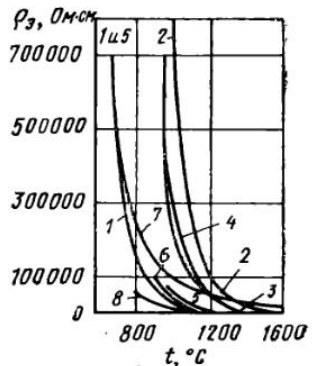


Рис. 44. Зависимость электросопротивления ρ_z огнеупорных материалов от температуры t (в скобках указана пористость, %):

1 — кварцевый песок прессованный (25,42); 2 — гидрат окиси глинозема (25,78); 3 — магнезит, обожженный при 1200°C (24,75); 4 — известь, обожженная при 1300°C (17,46); 5 — каолин, обожженный при 1500°C (17,46); 6 — днаас, содержащий 95,8% SiO₂ (29,51); 7 — шамотный кирпич, содержащий 53,12% SiO₂; 8 — то же, содержащий 43,48 Al₂O₃ (26,66)

Таблица VI-17

Физико-химические свойства магнитных, магнетитохромитовых и хромомagnetитовых изделий

Показатели	Магнетитовые изделия	Хромомagnetитовые изделия	Магнетитохромитовые изделия для сводов мартеновских и электрошлаковых печей, изготавливаемые из хромагита				Магнетитохромитовые изделия для футеровки кессонов и других элементов сталеплавильных печей	Хромомagnetитовые и магнетитохромитовые изделия				Изделия для кладки высокотемпературных туннельных печей		Магнетитовые высокоокислительные изделия с повышенными плотностью
			I сорт		II сорт			кирпич безобжиговый в обоях	для стен головок и вертикальных каналов	для сводов		Магнетитохромитовые	Выше	
			кимперсайского	сарановского	кимперсайского	сарановского				с содержания хрома < 60%	с содержания хрома < 50%			
Содержание MgO, %	> 91,0	> 42	> 60	> 60	> 60	> 60	> 60	> 42	> 40	> 45	> 57	> 42	> 86	
Содержание CaO, %	≤ 3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Содержание SiO ₂ , %	—	> 15	> 12—18	> 12—18	> 12—18	> 8—13	> 8—13	> 16	> 20	> 16	> 8	> 15	—	
Предел прочности при сжатии, МН/м ²	> 39,2*1	> 24,5*2	> 24,5	> 19,6	> 19,6	—	—	> 39,2	> 44,1	> 44,1	—	> 14,7	—	
Объемная масса, г/см ³ (с учетом пористости)	> 2,6*1	Не нормируется	—	—	—	—	—	> 3,0	> 3,1	> 3,05	—	—	—	
Плотность, г/см ³ , без учета пористости	—	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Температура начала деформации под нагрузкой 0,196 МН/м ² , °С	1500	1450	1500	1500	1500	—	—	—	—	—	—	—	—	
Пористость кажущаяся, %	Не нормируется	≤ 24*2	≤ 23*3	≤ 24*3	≤ 24*3	—	—	—	—	—	≤ 32	—	≤ 15	
Термическая стойкость, число теплосмен	—	—	> 25	> 25	> 25	—	—	—	—	—	—	—	—	

*1 Для изделий II сорта допускается предел прочности при сжатии > 34,3 МН/м² и плотность с учетом пористости > 2,56 г/см³. *2 Для изделий II сорта допускается предел прочности при сжатии > 19,6 МН/м² и пористость < 25%. *3 Для кирпичей пятового, прямого и клинового размером 520 мм допускается пористость для изделий I сорта 24%, для изделий II сорта 26%.

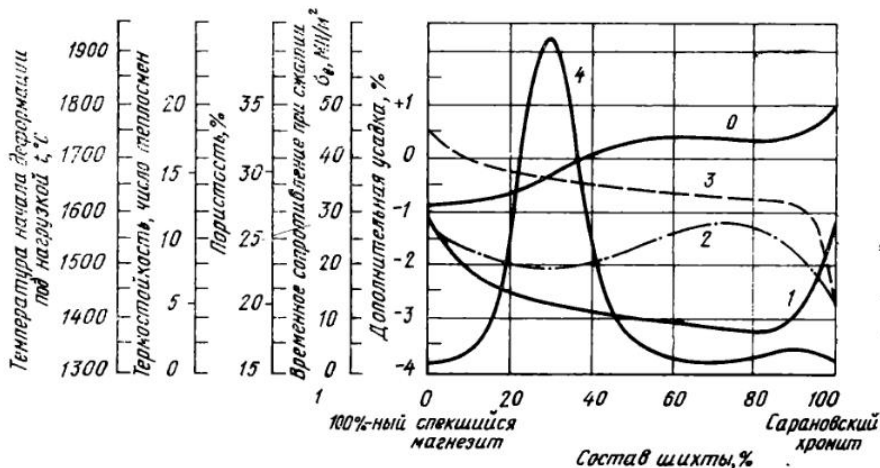


Рис. 45. Изменение свойств обжиговых хромомагнезитовых огнеупоров:

0 — дополнительная усадка при обжиге 1600°C и выдержке 2 ч; 1 — предел прочности при сжатии; 2 — пористость; 3 — термостойкость изделий при водяном охлаждении; 4 — температура начала деформации под нагрузкой

Свойства углеродистых изделий

Плотность (с учетом пористости), г/см ³	1,55—1,65
Пористость, %:	
кажущаяся	15—18
истинная	16—19
Предел прочности, при сжатии, МН/м ²	24,5—29,4
Деформация под нагрузкой при высоких температурах	Не деформируется
Коэффициент линейного расширения в интервале 0—700°C	$0,37 \cdot 10^{-5}$
Удельное электросопротивление, Ом·см	$5,5 \cdot 10^{-3}$
Теплопроводность при средней температуре 400°C, Вт/(м·°C)	6,75—7,10
Дополнительный линейный рост после обжига, %, при температуре, °C:	
1400	0,0—0,0
1500	0,0—0,1
1600	0,0—0,3
Истираемость (на круге с подсыпкой песком), г/см ²	0,25—0,55
Содержание золы, %	2,5—3,0

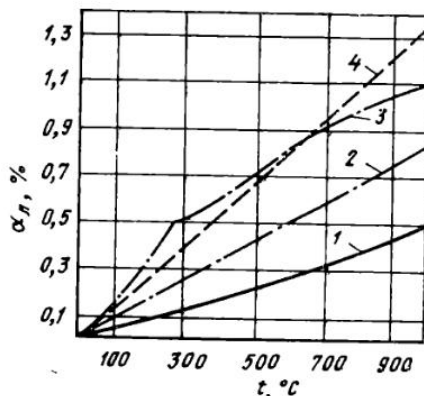


Рис. 46. Зависимость коэффициента линейного расширения α_L важнейших огнеупоров от температуры t :

— шамотных; 2 — корундовых; 3 — полукислых; 4 — магнезитовых

Таблица VI-18

Свойства карборундовых изделий Семилукского завода

Показатели	I класс	II класс	III класс	I класс
Содержание, %:				
SiC	84,38	85,21	84,07	84,14
SiO ₂	10,51	10,70	10,70	11,26
R ₂ O ₃	3,94	3,46	3,98	4,06
Плотность, г/см ³ , с учетом пористости	2,43	2,34	2,45	2,51
Пористость кажущаяся, %	21,0	19,0	21,1	19,6
Предел прочности при сжатии, МН/м ²	61,1	41,5	73,7	75,3
Водопоглощение, %	8,6	10,6	8,7	7,8
Потери при прокаливании, %	0,29	0,14	0,32	0,37
Температура деформации под нагрузкой, °C	1538	1540	1540	—
Жаростойкость, °C	1500	>1500	—	—
Термостойкость, число теплосмен	100—300	100—300	100—300	—
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	8—13	8—13	8—13	—

Таблица VI-19

Средние теплоемкости высокоогнеупорных материалов $c_{ср}$, кДж/(кг·°C)

Материал	$c_{ср}$ в интервале температур от указанной до t , °C							
	100	200	400	600	800	1000	1200	1400
Корунд (искусственный), от 20°C	—	0,883	0,967	1,051	1,139	1,273	—	—
Глинозем, от 15°C	0,873	0,921 (95)	1,005 (420)	1,029 (520)	—	—	—	—
Муллит, от 20°C	—	0,674	0,699	0,724	0,733	—	—	—
Кланит (борисовский), от 20°C	—	—	0,963	1,029	1,068	1,105	1,130	—
Андалузит (Семиз-Бугу), от 20°C	—	—	0,939	1,089	1,156	1,185	1,202	—
Силлиманит, от 0°C	—	—	0,959	1,029	1,068	1,080	1,097	—
Муллитовые изделия, от 20°C	—	—	—	1,089	—	—	1,202	—
Магнетитовые изделия 88% MgO, от 25°C	—	—	—	1,109 (605)	1,147 (825)	1,193 (1042)	1,223 (1115)	—
Спекшийся магнетит	—	1,059	1,151	1,214	1,323	1,357	1,461 (1300)	—
Серпентин, от 20°C	—	—	1,181	1,306	1,691	1,725	1,612	—
Шпинель, от 0°C	—	0,896 (0—243)	0,959 (399)	1,047 (632)	1,068 (886)	1,076 (1042)	—	—
Известь (плавленная), от 0°C	0,699	0,720 (190)	0,758 (375—400)	0,808 (590—680)	—	—	—	—
Оксид циркония (99% ZrO ₂), от 25°C	0,549	—	—	0,574 (400—800)	0,528— 561,3	0,657	0,699	0,733
Циркон (ильменский), от 20°C	—	—	0,674	0,699	0,729	0,762	0,791	—
Хромитовые изделия	—	0,745 (218)	0,879 (382)	0,925 (579)	0,900 (894)	—	—	—
Хромит (халиловский), от 20°C	—	—	0,929	0,938	1,026	1,135	1,047	—
Карборунд (кристаллический), от 0°C	—	0,976	1,159	1,151	0,942	0,955	—	—
Карборундовые изделия типа карбофракс:								
90% SiC	—	—	—	1,055	1,068	1,109	1,114	1,143
92% SiC	—	—	—	—	—	1,105	1,114	1,214 (1350)
Графит	0,873	1,063 (138)	—	—	—	1,955 (977)	—	1,98 (0—2000)

Примечание. В скобках даны температуры конца интервала, всего интервала или температура, при которой проведено исследование.

Виды огнеупорных изделий, применяемых металлургической промышленностью

Объект применения	Виды огнеупорных изделий								Заправочные материалы			
	Памотные и полукислые	Динас	Высокоглиноземистые	Магнезитовые, хромомагнезитовые и магнезитохромитовые	Фосфоритовые	Углеродистые блочки	Карборундовые	Легковесные	Магнезитовый порошок	Доломит обожженный	Доломит сырой	Мертели, орнеупорные попошки и массы
Коксовые печи	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Доменные печи	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Воздухонагреватели	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Чугунозные ковшки	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Маргеновские печи	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Электросталеплавильные печи	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Конверторы:												
основные	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
кислые	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Сталеразливочный припас:												
футеровка ковшей	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
стопорные трубки	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
пробки и стаканы	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
сифонные изделия	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
прибыльные надставки	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
футеровка желобов	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Нагревательные и термические печи прокатных, трубопрокатных, термических и калибровочных цехов	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Печи чугунолитейных, сталелитейных, кузнечно-прессовых цехов	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Печи для обжига доломита и известняка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Тепловые агрегаты огнеупорных цехов	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. Знаком плюс отмечены случаи, когда огнеупорное изделие применяется, знаком минус — случаи, когда они обычно не применяются

Таблица VI-21

Шлакоустойчивость огнеупорных изделий

Огнеупоры	Основные шлаки и окислы	Кислые шлаки и окислы	Окислительные реагенты	Восстановительные реагенты	Металлы
Корундовые	У	У	У	У, до 1800°C	О
Бокситовые	У	У	У	У	О
Муллитовые (силлиманитовые)	У	О	О	У	О
Плавленные муллитовые	О	О	О	О	О
Магнезитовые	О	П	О	У, до 1450°C	О
Хромитовые	О	У	О	У, до 1500°C	О
Хромомagneзитовые	О	У	О	У, до 1500°C	О
Циркониевые	У	О	О	П	О
Цирконовые	У	О	О	П	О
Карборундовые	П	У	П	О	П
Коксовые	О	У	П	О	О
Графитовые	О	У	П	О	О
Шамотные	У	У	О	О, до 1400°C	У
Диасовые	П	О	О	О, до 1600°C	У

Примечание. О — отличная, У — удовлетворительная; П — плохая шлакоустойчивость.

Таблица VI-22

Температуры, °С, при которых начинаются реакции между различными огнеупорами, соприкасающимися между собой

Огнеупор	Изделия из огнеупорной глины	Высокоглиноземистые изделия (70% глинозема)	Хромитовые изделия	Маложелезистый магнезит	Обычный магнезит	Форстерит
Диас	1500	1600	Нет реакций	1500	1500	1700
Изделия из огнеупорной глины	—	Нет реакций	1600	1500	1400	1500
Высокоглиноземистые изделия (70% глинозема)	—	—	1600	1700	1500	1700
Хромитовые изделия	—	—	—	Нет реакций	Нет реакций	Нет реакций
Маложелезистый магнезит	—	—	—	—	То же	То же
Обычный магнезит	—	—	—	—	»»	»»

Таблица VI-23

Характеристика и состав некоторых жароупорных бетонов

Бетон	Компоненты бетона			Допустимая максимальная температура элементов конструкции, °С	Марка бетона	Прочность при максимальной допустимой температуре, МН/м²
	вяжущее	тонкомолотая добавка	мелкий и крупный заполнитель			
Жароупорный бетон на глинозёмистом цементе	Глинозёмистый цемент	—	Хромитовая руда	1400	150—300	5,0—10,0
То же	То же	—	Шамот огнеупорностью не ниже 1730°С	1300	100—300	3,5—10,0
Жароупорный бетон на портландцементе с тонкомолотой добавкой	Портландцемент	Шамот огнеупорностью не ниже 1730°С	Шамот огнеупорностью не ниже 1730°С	1200	100—300	3,5—10,0
То же	То же	Шамот огнеупорностью не ниже 1610°С или кварц	Шамот огнеупорностью не ниже 1610°С	1100	100—300	3,5—10,0

Состав жаропрочного хромагнетитового бетона для тепловой изоляции подовых труб огнеупорными блоками, % (по массе)

Глинозёмистый цемент марки 400—500 с содержанием SiO ₂ не более 11% по ГОСТ 969—66	15
Хромитовая руда (50% 7—2 мм, 45% 2—0,88 мм, 5% <0,88 мм; по ТУ 2943—51)	60
Бой магнетитохромитового кирпича по ТУ 2886—54	25
Количество воды	7—8% к количеству сухой массы

Таблица VI-24

Физико-механические свойства жароупорного бетона

Показатели	На глинозёмистом цементе с хромитовым заполнителем	На глинозёмистом цементе с шамотным заполнителем	На портландцементе с шамотным заполнителем
Температура деформации бетона под нагрузкой 0,196 МН/м², °С:			
начало деформации	1350	1250	1100
конец деформации	1450	1350	1250

Показатели	На глиноземистом цементе с хромитовым наполнителем	На глиноземистом цементе с шамотным наполнителем	На портландцементе с шамотным наполнителем
Коэффициент линейного термического расширения в интервале от 20 до 900°C	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Линейная усадка при максимальных температурах, %	0,4—1,0	0,4—1,0	0,4—1,0
Плотность (с учетом пористости), т/м ³	2,8—2,9	1,8—1,9	1,8—1,9

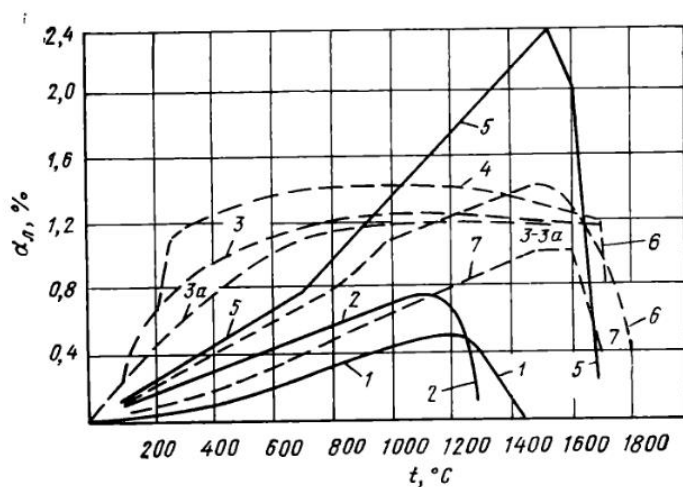


Рис. 47. Зависимость полного линейного расширения α_t некоторых огнеупорных изделий от температуры t : 1 — шамотный кирпич; 2 — полукислый огнеупорный кирпич; 3 — динас; 3а — легковесный динас; 4 — динас, вторично нагретый до 1630—1670°C; 5 — магнезитовый кирпич; 6 — хромитовый кирпич; 7 — высокоглиноземистый кирпич

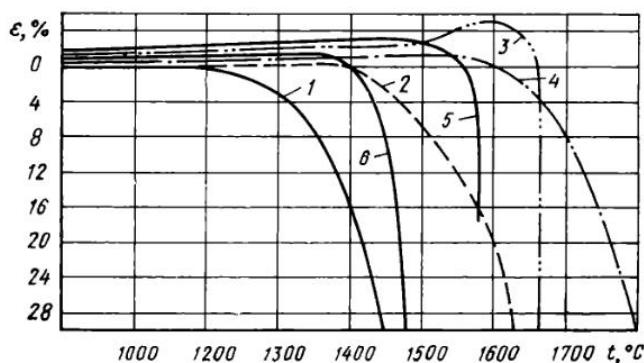


Рис. 48. Характеристики деформации ϵ под нагрузкой при высоких температурах t для важнейших огнеупоров: 1, 2 — шамот; 3 — динас; 4 — высокоглиноземистый (70% Al_2O_3); 5 — магнезит; 6 — полукислый

Характеристика магнезиальных огнеупорных бетонов

Бетон	Заполнитель	Пористость, %	Предел прочности при сжатии, МН/м ²	Изменение размеров при нагреве до 1650°C и выдержке 4 ч, %	Температура начала деформации образцов под нагрузкой кой, 0,196 МН/м ² , °C	
					необожженных	обожженных при 1650°C и выдержке 4 ч
Хромомagneзитовый	70% хромита крупностью <7 мм, 60% хромита крупностью <2 мм и 10% титаноглинозистого шлака крупностью 2—0,5 мм	12—14 14,0	30 50	—0,7 +0,3	1480 1410	1490 1690
Магнезитохромитовый	70% лома магнезитохромитового кирпича крупностью <5 мм и 10% титаноглинозистого шлака 2—0,5 мм	16,0	50	—0,6	1430	1580
Магнезитокорундовый	57% боя магнезитового кирпича крупностью <2 мм и 10% электроплавяного корунда <0,7 мм	14,0	33	+0,4	1450	1560
Оливинитомagneзитовый	70% оливинита крупностью <7 мм	10,6	40	—0,6	1640	1690
Дунитомagneзитовый	70% дунита, обожженного при 1450°C, крупностью <7 мм	17,6	42	—0,3	1580	1780

Таблица VI-26

Коэффициент объемного расширения $\beta \cdot 10^6$ огнеупорных материалов, $1/^\circ\text{C}$

Материал	Температура, $^\circ\text{C}$									
	до 150	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	
Корунд искусственный (99% Al_2O_3)	—	—	—	—	7,9 (25—800)	—	—	—	—	
Корунд естественный	6,0	—	—	—	—	—	—	—	—	
Корундовые изделия с 10% глины	—	—	6,3 (300)	—	—	6,24 (25—1000) 8,0	—	—	—	
Бокситовые изделия	—	5,5	—	7,2	—	—	—	—	—	
То же, из плавленого боксита (64% Al_2O_3)	—	—	—	—	—	—	—	7,1 (0—1370)	—	
Муллит (обожженный до 1800°C)	—	—	—	—	—	—	—	5,4 (20—1400)	—	
Муллит искусственный	3,6	3,9 (250)	4,5 (375)	5,9 (575)	6,0 (850)	—	—	—	—	
Магнезитовые изделия (2,5% Fe_2O_3)	—	—	—	—	—	13,2 (20—1000)	—	—	—	
Магнезит спекшийся (88% MgO)	—	—	—	—	—	—	12,6 (20—1200)	16,1 (0—1430)	—	
Магнезитовые изделия, от 20°C	—	—	—	—	—	11,0	—	—	11,9	
Магнезит плавленый (95% MgO), от 20°C	7,24 (50)	13,3 10,51	11,78	12,75	13,1	13,61	—	—	—	

Материал	Температура, °С									
	до 150	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	
Ферритовые изделия	—	—	—	—	—	10,7 (20—1000)	—	—	—	—
Оксид циркония (плавленая)	—	—	—	—	6,2 (25—800)	—	—	—	—	5,9 (0—1600)
Циркон	3,3 (150)	3,7 (250)	4,1 (375)	4,9 (575)	4,5 (850)	—	—	6,4 (0—1510)	—	—
Циркон электроплавный	4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Хромитовые изделия (50,23% Cr ₂ O ₃)	—	6,0	6,3 (300)	6,7	—	8,0	—	10,7 (0—1530)	—	—
Карборундовые изделия типа карбофракс (85% SiC)	—	5,39 (100—200)	—	—	4,38 (700—800)	4,7 (200—900)	—	5,0 (25—1400)	—	—
Карборундовые изделия типа рефракс	—	—	—	—	—	4,7 (800—900)	—	—	—	—
Графит	7,8 (40)	—	—	—	—	—	—	5,0 (25—1400)	—	—
Для сравнения:										
шамот, от 0°	—	8,5	5,8	5,1	5,1	5,3	—	—	—	—
динас, от 20°	12,2 (100)	22,5	25,1	21,5	14,6	12,3	10,3	—	—	—

Примечание. В скобках даны температуры конца интервала, всего интервала или температуры, при которой проведено исследование.

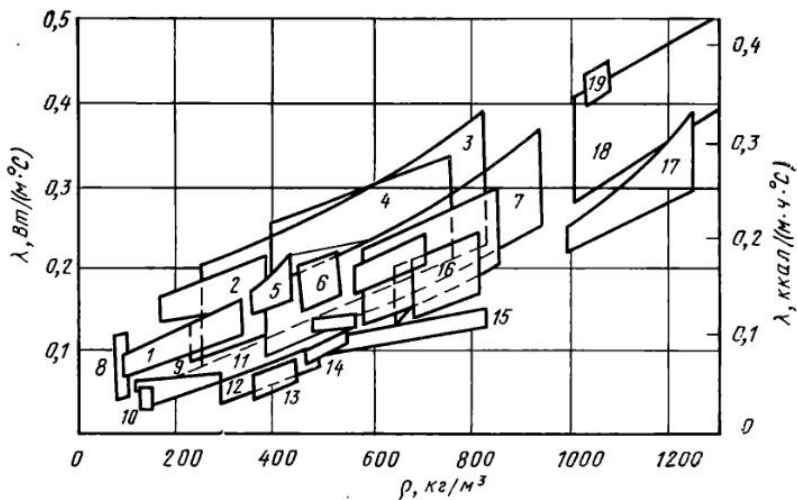


Рис. 49. Зависимость коэффициента теплопроводности λ от плотности ρ по опытным данным для некоторых теплоизоляционных материалов: 1 — торф; 2 — фибролит; 3 — пенобетон; 4 — ксилосиликаты; 5 — пенопемзобетон; 6 — пробковый кирпич; 7 — термоизоляционный кирпич; 8 — шевелин; 9 — торфоплита; 10 — прессованный торф; 11 — шлаковая пробка; 12 — стром-органик; 13 — теплая штукатурка; 14 — пенобетон; 15 — гранулированный шлак; 16 — газобетон; 17 — арктический туф; 18 — шлак; 19 — известково-трепельный органик;

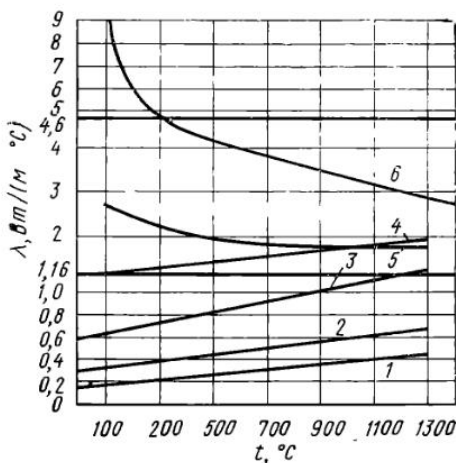


Рис. 50. Зависимость коэффициента теплопроводности λ для некоторых огнеупоров от температуры t : 1 — ультралегковес; 2 — легковесный шамот; 3 — легковесный динас; 4 — динас; 5 — форстерит; 6 — магнезит

Состав и свойства некоторых исследованных огнеупоров

Показатели	Огнеупорный материал			
	ультралегковес Запорожского завода (кривая 1)	легковесный динас Первоураль- ского завода (кривая 3)	форстеритовый кирпич Пантелеймо- новского завода (кривая 5)	чехосло- вацкий магнезит (кривая 6)
Содержание, %:				
SiO ₂	57,96	92,95	27,10	1,56
MgO	1,14	0,22	60,59	88,10
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	35,73	1,75	1,94	1,35
Fe ₂ O ₃	1,67	1,62	8,66	6,40
CaO	0,57	3,00	1,58	2,55
Объемная масса, г/см ³	0,31	1,09	2,55	3,73
Кажущаяся пористость, %	88,0	53,5	24,5	22,7
П. п. п.	0,46	0,20	0,28	0,26

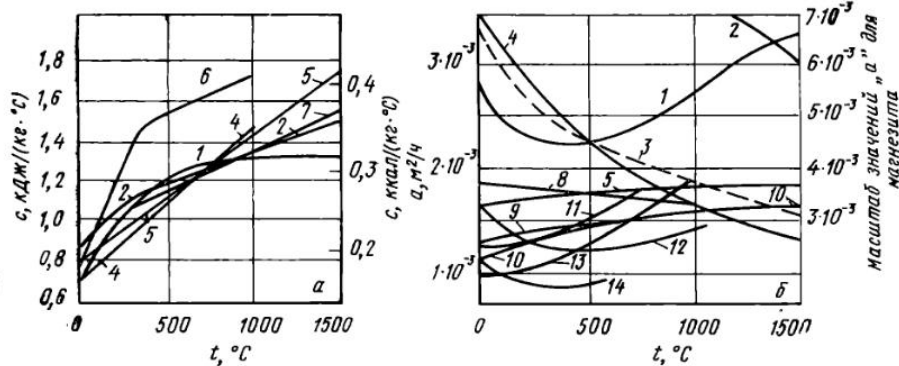


Рис. 51. Зависимость истинной теплоемкости c (а) и коэффициента температуропроводности α (б) огнеупорных и изоляционных материалов от температуры (при ρ , кг/м^3): 1 — динас (1980); 2 — магнезит; 3 — магнезит (2700); 4 — хромомагнезит (2870); 5 — шамот (1860); 6 — углеродистый кирпич; 7 — высокоглиноземистый кирпич; 8 — пеношамот (800); 9 — красный кирпич (1600); 10 — шамот-легковес с выгорающими добавками (1250); 11 — шлаковата (250); 12 — ирбитский трепельный кирпич (930); 13 — пенотрепельный кирпич (460); 14 — новобазоурит (710)

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица VI-27

Основные свойства пористых огнеупорных изделий (легковесов)

Плотность (с учетом пористости), г/см^3	Предел прочности при сжатии, МН/м^2	Огнеупорность, $^{\circ}\text{C}$	Начало деформации под нагрузкой $0,196 \text{ МН/м}^2$ при температуре, $^{\circ}\text{C}$	Допустимая температура, $^{\circ}\text{C}$	Область применения	
Химлегковес						
0,74	2,9—3,9	1710	1190	1200	Для печей, работающих непрерывно без резких колебаний температуры	
Пенолегковес						
0,54—0,61	2,4—3,4	1710—1730	1130—1260	1150—1300		
Ультралегковес						
0,27—0,33	0,7—1,0	1710—1730	1130	1100	Защитная изоляция высокотемпературных печей	
Пеношамот						
0,95	2,94	1740	1340	1350	Для всех печей	
0,6	1,0	1630	1280	1300		
Легковес с выгорающими добавками						
1,3	4,90	1750	1300	1300		
1,0	2,94	1700	1250	1260		

Таблица VI-28

Зависимость коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·°С), от температуры для волокнистых и сыпучих материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Формула для определения λ , Вт/(м·°С)
Асбест (длинноволокнистый)	150	$0,639 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	300	$0,08 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Асбест VI сорта	400—450	$0,106 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	800	$0,209 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Асбозурит	400—450	$0,100 + 3,61 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Вата минеральная	150	$0,042 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	200	$0,047 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	250	$0,053 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Вата минеральная гранулированная)	175	$0,044 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	200	$0,048 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Вата стеклянная	150	$0,029 + 2,21 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	200	$0,039 + 2,33 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	230	$0,062 + 1,39 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Вермикулит обожженный (зернистый)	125	$0,073 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	150	$0,079 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Вулканический пепел	945	$0,169 + 6,13 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Диатомит инзенский	300	$0,077 + 2,79 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Диатомовая крошка (обожженная)	450	$0,079 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Древесные опилки	160	$0,055 + 4,44 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Казенновая шерсть	85	$0,044 + 0,93 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Маты и полосы из стекловолокна	180	$0,055 + 1,79 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Очесы хлопчатобумажные	80	$0,055 + 1,63 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Очесы шерстяные	140	$0,32 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Перлит в засыпке	200	$0,089 + 2,09 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Пробковая крошка	80	$0,035 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Рисовая шелуха	180	$0,055 + 1,79 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Совелит	230	$0,062 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Торф фрезерный	350	$0,071 + 2,09 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Трепел молотый	650	$0,105 + 2,3 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Хлопковые остатки	320	$0,08 + 2,79 \cdot 10^{-4} t_{ср}$

Таблица VI-29

Зависимость коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·°С), от температуры для теплоизоляционных материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Формула для определения λ , Вт/(м·°С)
Алюминиевая фольга с воздушными прослойками:		
гладкая	3	$0,052 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
мятая	5	$0,698 + 1,98 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Асбестовый картон	100 — 1200	$0,157 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Асбестовая ткань	600	$0,126 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Асбестовый шнур	800	$0,128 + 1,5 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Асбовермикулитовые изделия	250	$0,078 + 1,9 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
	300	$0,084 + 2,09 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Асбозурит	700	$0,162 + 1,69 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Бетоны с заполнителем:		
диатомит с глиноземистым цементом (4:1 по объему)	960	$0,202 + 1,7 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
вспученная глина с глиноземистым цементом (4:1 по объему)	1400	$0,428 + 1,3 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
пористый каолин с глиноземистым цементом (6:1 по объему)	1050	$0,28 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{ср}$
Войлок строительный шерстяной	300	$0,047 + 1,9 \cdot 10^{-4} t_{ср}$

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Формула для определения $\lambda, \text{Вт/}(м \cdot ^\circ\text{C})$
Вулканист	400	$0,078 + 1,7 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Диатомит инзенский (порода)	680	$0,171 + 2,32 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Диатомовые обожженные изделия	500	$0,10 + 2,33 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
	600	$0,127 + 2,33 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
	700	$0,16 + 3,1 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Легковесный кирпич	900	$0,28 + 2,4 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Легковес с выгорающими добавками	1000	$0,29 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
	1300	$0,41 + 3,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Минераловатные плиты на связке из крахмала или глины	350	$0,077 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
	450	$0,088 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Ньювель	400-465	$0,087 + 0,64 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Огнеупорный легковес	750	$0,14 + 2,7 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Пенодиатомовый кирпич	400	$0,08 + 2,2 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Пенолегковес	540-610	$0,09 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Пеношамот	600	$0,10 + 1,45 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
	950	$0,28 + 1,7 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Полукислый шамот	1830	$0,66 + 3,7 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Пробковая плита	250	$0,07 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Пробка экспанзит	130	$0,05 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Совелит формованный	400	$0,088 + 0,09 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Торфяные плиты:		
прессованные	200	$0,07 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
формованные	150	$0,06 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Ультралегковес	350	$0,08 + 3,02 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Химлегковес	740	$0,15 + 1,3 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Шевелин:		
одинарный	260	$0,052 + 1,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
двойной	140	$0,47 + 1,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Шлаковая пробка	350	$0,08 + 2,2 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$
Шлак доменный	800	0,150
	700	0,130
	600	0,115
	700	0,125
	600	0,110
Шлак гранулированный	500	0,095
	400	0,08
	1300	0,32
Шлак котельный	1200	0,29
	1100	0,26
	1000	0,23
	900	0,20

* При 30°C.

Таблица VI-30

**Коэффициент теплопроводности λ термозоляционных материалов
в зависимости от влажности и температуры t**

Материал различной плотности ρ , кг/м ³	Темпе- рату- ра, t °C	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C), при влажности W , %						
		0	10	20	30	40	50	60
Асбестоцементные теплоизо- ляционные плиты: $\rho = 410^{*2}$	65	0,105	0,291	0,384	0,436	0,483	0,523	0,552
	10	0,093	0,122	0,163	0,198	0,227	0,256	0,279

Материал различной плотности ρ , кг/м ³	Темпе- рату- ра, t , °C	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C), при влажности W , %						
		0	10	20	30	40	50	60
Газостекло (пеностекло): $\rho=280^{*2}$	65 5	0,069 0,058	0,106 0,072	0,139 0,087	0,167 0,101	0,186 0,116	— —	— —
Диатомовые обожженные из- делия ^{*1} :								
$\rho=1000$	20—30	0,231	0,319	0,392	0,459	—	—	—
$\rho=800$	20—30	0,174	0,250	0,302	0,361	0,413	—	—
$\rho=600$	20—30	0,128	0,187	0,230	0,271	0,308	0,350	—
$\rho=400$	20—30	0,087	0,126	0,157	0,183	0,206	0,227	0,251
$\rho=200$	20—30	0,064	0,081	0,099	0,116	0,129	0,142	0,157
Диатомовые обожженные кир- пичи ^{*2} :								
$\rho=740$	10	0,163	0,267	0,384	0,488	0,605	0,709	0,814
$\rho=660$	5	0,116	0,169	0,221	0,279	0,326	0,378	0,436
$\rho=550$	20	0,116	0,186	0,244	0,285	0,302	0,319	0,337
Диатомовая крошка ^{*2} : $\rho=510$	0	0,081	0,110	0,139	0,160	0,186	0,211	0,238
	10	0,084	0,122	0,151	0,179	0,204	0,233	0,265
	20	0,086	0,134	0,174	0,209	0,238	0,267	0,302
	30	0,088	0,163	0,215	0,259	0,297	0,331	0,361
	40	0,091	0,204	0,267	0,319	0,366	0,407	0,442
	50	0,093	0,238	0,326	0,395	0,448	0,494	0,529
	60	0,095	0,291	0,399	0,488	0,561	0,616	0,662
70	0,097	0,378	0,523	0,628	0,709	0,768	0,802	
Камышит ^{*1} :								
$\rho=400$	20—30	0,107	0,133	0,154	0,172	0,187	0,204	0,221
$\rho=300$	20—30	0,093	0,113	0,119	0,134	0,142	0,154	0,166
$\rho=200$	20—30	0,069	0,078	0,087	0,094	0,102	0,106	0,114
Минеральная вата ^{*1} :								
$\rho=400$	20—30	0,076	0,087	0,105	0,116	0,130	0,145	0,159
$\rho=300$	20—30	0,060	0,069	0,078	0,087	0,093	0,100	0,107
$\rho=200$	20—30	0,046	0,052	0,057	0,062	0,066	0,069	0,076
Минеральная вата ^{*2} :								
$\rho=350$	20	0,058	0,081	0,100	0,119	0,136	0,155	0,172
$\rho=200$	20	0,047	0,053	0,059	0,065	0,072	0,078	0,084
$\rho=120$	20	0,035	0,037	0,042	0,044	0,047	0,049	0,052
Пенобетон ^{*1} :								
$\rho=1200$	20—30	0,319	0,433	0,535	—	—	—	—
$\rho=1100$	20—30	0,286	0,389	0,485	0,569	—	—	—
$\rho=1000$	20—30	0,254	0,352	0,439	0,516	—	—	—
$\rho=900$	20—30	0,221	0,308	0,392	0,462	0,516	—	—
$\rho=800$	20—30	0,192	0,272	0,343	0,409	0,469	—	—
$\rho=700$	20—30	0,169	0,241	0,308	0,366	0,419	0,454	—
$\rho=600$	20—30	0,149	0,207	0,262	0,309	0,355	0,397	—
$\rho=500$	20—30	0,134	0,180	0,219	0,256	0,286	0,316	0,347
$\rho=400$	20—30	0,119	0,151	0,183	0,215	0,241	0,267	0,291
$\rho=300$	20—30	0,107	0,134	0,163	0,179	0,198	0,215	0,233
Пенобетон автоклавный:								
$\rho=460$	10	0,097	0,139	0,177	0,207	0,233	0,250	0,267
	20	0,099	0,151	0,192	0,227	0,256	0,277	0,300
	30	0,101	0,165	0,216	0,258	0,291	0,314	0,335
	40	0,104	0,189	0,254	0,300	0,339	0,372	0,398
	50	0,106	0,216	0,291	0,355	0,407	0,449	0,484
	60	0,107	0,245	0,336	0,409	0,472	0,530	0,579
	70	0,110	0,286	0,397	0,488	0,586	0,634	0,695
То же ^{*2} :								
$\rho=280$	65 5	0,087 0,058	0,137 0,069	0,186 0,088	0,241 0,093	0,291 0,105	0,343 0,116	0,395 0,128
Песок ^{*2} :								
$\rho=1380$	0—40	0,349	0,663	0,930	—	—	—	—
$\rho=1640$	0—40	0,372	0,965	1,232	—	—	—	—

Материал различной плотности ρ , кг/м ³	Темпе- рату- ра, t , °C	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C) при влажности W , %						
		0	10	20	30	40	50	60
Соломит*1: $\rho=150$	20—30	0,058	0,063	0,069	0,076	0,081	0,087	0,093
Стеклянная вата*1: $\rho=200$	20—30	0,047	0,052	0,059	0,064	0,069	0,074	0,079
$\rho=150$	20—30	0,041	0,044	0,050	0,053	0,057	0,060	0,064
Шлак гранулированный*1: $\rho=700$	20—30	0,145	0,198	0,247	0,288	0,326	0,361	—
$\rho=600$	20—30	0,128	0,174	0,211	0,245	0,279	0,314	—
$\rho=500$	20—30	0,110	0,151	0,180	0,209	0,238	0,267	0,297
$\rho=400$	20—30	0,093	0,131	0,156	0,180	0,204	0,224	0,244
Шлак доменный*1: $\rho=800$	20—30	0,174	0,247	0,302	0,351	0,392	0,424	—
$\rho=700$	20—30	0,151	0,211	0,262	0,302	0,338	0,369	—
$\rho=600$	20—30	0,134	0,183	0,228	0,267	0,302	0,337	—
Шлак котельный*1: $\rho=1300$	20—30	0,372	0,505	0,622	—	—	—	—
$\rho=1200$	20—30	0,337	0,454	0,555	—	—	—	—
$\rho=1100$	20—30	0,302	0,407	0,500	0,582	—	—	—
$\rho=1000$	20—30	0,267	0,361	0,435	0,506	—	—	—
$\rho=900$	20—30	0,233	0,319	0,388	0,436	—	—	—
Торфяные плиты*1: $\rho=300$	20—30	0,067	0,087	0,104	0,119	0,135	0,152	0,167
$\rho=250$	20—30	0,061	0,073	0,087	0,102	0,114	0,126	0,137
$\rho=200$	20—30	0,052	0,064	0,076	0,086	0,094	0,105	0,114
$\rho=150$	20—30	0,045	0,055	0,060	0,069	0,076	0,081	0,087
Торф сфагнум*1: $\rho=400$	20—30	0,128	0,147	0,171	0,192	0,209	0,227	0,244
$\rho=300$	20—30	0,107	0,119	0,135	0,147	0,158	0,171	0,184
$\rho=200$	20—30	0,087	0,098	0,107	0,116	0,123	0,128	0,135
$\rho=100$	20—30	0,069	0,076	0,080	0,086	0,088	0,091	0,094

*1 Коэффициенты теплопроводности определены при стационарном режиме. *2 То же, при нестационарном (регулярном) режиме.

Таблица VI-31

Теплоемкость c , кДж/(кг·°C), некоторых термоизоляционных материалов при 20°C

Материал	c , кДж	Материал	c , кДж
	(кг·°C)		(кг·°C)
Асбест (волокно)	0,837	Минеральная вата	0,921
Асбест (картон, шнур и т. п.)	0,837	Пенобетон	0,837
Асбоцементные плиты	0,837	Соломит	1,507
Войлок (шерстяной)	1,884	Стекловолокно	0,837
Диатом	0,837	Торфяные плиты	2,093
Зола и шлаки	0,754	Торф сфагнум	2,093
Камышит	1,507	Фибролит	2,303

ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ

В настоящем разделе приведены справочные материалы по газообразному, жидкому и твердому топливам. Кроме чисто теплотехнических данных, характеризующих количество образующихся продуктов сгорания при сжигании горючих компонентов, количества потребного воздуха и пр.; приведены таблицы теплофизических свойств (теплемкость, энтальпия, вязкость и др.), относящихся непосредственно к топливу и продуктам сгорания. Характеристики теплофизических свойств химических элементов, окислов, газов и сплавов приведены в разделе первом.

Основные понятия и обозначения

- A^c — зольность сухой массы топлива, %;
- $B = V_{\text{сух}}/V$ — отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания;
- B — объем газообразного топлива, м^3 , L^3 либо расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$; L^3T^{-1} ;
- $\text{CO}, \text{H}_2, \text{C} \dots$ — содержание компонентов, %;
- C^r — содержание углерода в горючей массе топлива, %;
- $(\text{CO}_2)_k^c$ — содержание углекислоты карбонатов в сухой массе топлива, %;
- G — масса; расход топлива по массе G_B ; воздуха G_L ; продуктов сгорания G_V , кг, т; М;
- $G_{v4,2}$ — масса продуктов сгорания, образующихся при сжигании топлива, эквивалентного 4,2 МДж тепла; в кг на 4,2 МДж тепла; М;
- H^r — содержание водорода в горючей массе топлива, %;
- $i_{v\text{сух}}$ — энтальпия, низшая теплота сгорания топлива, отнесенная к 1 м^3 сухих продуктов сгорания, $\text{кДж}/\text{м}^3$, $L^{-1}MT^{-2}$;
- i^G — энтальпия 1 кг влажных продуктов сгорания топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$, L^2T^{-2} ;
- i_v — энтальпия 1 м^3 влажных продуктов сжигания топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$. Низшая теплота сгорания топлива, отнесенная к 1 м^3 продуктов сгорания, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $L^{-1}MT^{-2}$;
- $K_{л.о}$ — относительный лабораторный коэффициент размолотности топлива по методике ВТИ, который характеризует отношение расходов энергии при размолоте эталонного и испытуемого топлива в воздушно-сухом состоянии и измельчения их от одинаковой крупности до одной и той же тонкости. В качестве эталонного топлива принят донецкий антрацитовый штыб;
- $L_{4,2}$ — объем воздуха, м^3 , теоретически необходимый для сжигания объема или массы топлива, содержащего 4,2 МДж тепла, $\text{м}^3/4,2 \text{ МДж}$ (1 $\text{м}^3/4185,5 \text{ кДж}$ или 1 $\text{м}^3/1000 \text{ ккал}$); L^3 ;

- $L_{\text{теор}}^{\text{сух}}$ — теоретический расход сухого воздуха, м^3 ; L^3 ;
 L_{α} — действительный объем воздуха, м^3 , подаваемого для сжигания топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; L^3 ;
 $L_{\text{теор}}$ — объем воздуха, м^3 , теоретически необходимый для сжигания 1 м^3 (кг) топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$, $\text{м}^3/\text{кг}$, L^3 ; L^3M^{-1} ;
 L — объем воздуха, м^3 , L^3 ; либо расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; м^3 в единицу времени L^3T^{-1} ;
 M — молекулярная масса, $\text{кг}/\text{моль}$; M ;
 $Q_{\text{в}}$ — высшая теплота сгорания топлива с учетом тепла, выделившегося при конденсации водяных паров продуктов сгорания, $\text{кДж}/\text{моль}$, $\text{кДж}/\text{кг}$, $\text{кДж}/\text{м}^3$ для газов; L^2T^{-2} ; $L^{-1}MT^{-2}$;
 $Q_{\text{н}}$ — низшая теплота сгорания топлива с учетом расхода тепла на образование водяного пара при сгорании водорода топлива и испарение содержащейся в топливе влаги, $\text{кДж}/\text{м}^3$, $\text{кДж}/\text{кг}$, $L^{-1}MT^{-2}$; L^2T^{-2} ;
 $Q_{\text{н}}^{\text{мас}}$ — низшая теплота сгорания топлива, отнесенная к единице массы топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; L^2T^{-2} ;
 $Q_{\text{н}}^{\text{об}}$ — теплота реакции горения горючих газов, отнесенная к единице объема, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $L^{-1}MT^{-2}$;
 $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$ — низшая теплота сгорания сухого топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$, L^2T^{-2} ; $\text{кДж}/\text{м}^3$; $L^{-1}MT^{-2}$;
 $Q_{\text{б}}^{\text{г}}$ — теплота сгорания в калориметрической бомбе горючей массы топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; L^2T^{-2} ;
 $Q_{\text{н}}^{\text{г}}$ — низшая теплота сгорания в бомбе горючей массы топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; L^2T^{-2} ;
 $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая теплота сгорания рабочего топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; L^2T^{-2} ;
 $q_{\text{со}}$, $q_{\text{п}2}$ и др. — теплота реакции горения горючих газов, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $L^{-1}MT^{-2}$;
 $R_{\text{оф.ш}}$ — универсальная газовая постоянная в нормальных физических условиях ($t=0^{\circ}\text{C}$, $p=101325 \text{ Н}/\text{м}^2$) по кислородной физической шкале. $R_{\text{оф.ш}}=(8316,96 \pm \pm 0,34) \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $L^2T^{-2}\theta^{-1}$;
 $RO_{2\text{max}}$ — максимально возможное содержание RO_2 (CO_2+SO_2) в сухих продуктах сгорания сернистого топлива (полнота сгорания в теоретически необходимом количестве воздуха), %;
 $S_{\text{об}}^{\text{с}}$ — содержание общей серы в сухой массе топлива, %;
 $S_{\text{с}}^{\text{с}}$ — то же, серы сульфатной, %;
 $S_{\text{к}}^{\text{с}}$ — то же, серы колчеданной, %;
 $S_{\text{к}}^{\text{г}}$ — содержание серы колчеданной в горючей массе топлива, %;
 $S_{\text{ор}}^{\text{г}}$ — то же, серы органической, %;
 t_1 — температура начала деформации золы в полувосстановительной газовой среде, $^{\circ}\text{C}$; θ ;
 t_2 — температура размягчения золы в полувосстановительной газовой среде, $^{\circ}\text{C}$; θ ;
 t_3 — температура начала жидкоплавкого состояния золы в полувосстановительной газовой среде, $^{\circ}\text{C}$; θ ;
 $t_{\text{всп}}$ — температура вспышки топлива, $^{\circ}\text{C}$; θ ;
 $t_{\text{ж}}$ — жаропроизводительность (нормальная калориметрическая температура), развиваемая при полном сго-

рании топлива в теоретически необходимом объеме воздуха, содержащего 1% (вес.) влаги, без учета каких-либо потерь тепла (температуры топлива и воздуха 0°C), $^{\circ}\text{C}$; θ ;

- $t_{\text{ж}}$ — жаропроизводительность топлива (калориметрическая температура сжигания топлива), развиваемая при полном сгорании топлива в теоретически необходимом объеме сухого воздуха, без учета каких-либо потерь тепла (температура топлива и воздуха, 0°C); $^{\circ}\text{C}$; θ ;
- $t_{\text{теор}}$ — теоретическая температура горения; определяется с учетом диссоциации продуктов сгорания при высокой температуре;
- $t_{\text{к}}$ — жаропроизводительность топлива с учетом подогрева газа и воздуха, $^{\circ}\text{C}$; θ ;
- V_L — избыток воздуха в продуктах сгорания, проценты к объему всех продуктов сгорания, %;
- $V_{\text{ог}}^r$ — объемный выход летучих веществ, $\text{см}^3/\text{г}$; L^3M^{-1} ;
- V^r — выход летучих веществ на горючую массу, %;
- $\Delta V = V - L$ — разность между объемом продуктов сгорания и количеством израсходованного воздуха, м^3 ; L^3 ;
- V_{α} — объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании топлива (количество воздуха отличается от теоретического в соответствии с α), м^3 ; L^3 ;
- $V_{4,2}$ — объем продуктов сгорания, м^3 , образующихся при сжигании объема или массы топлива, эквивалентных 4185,5 кДж тепла (или 1000 ккал), $1 \text{ м}^3/4,2$ ($1 \text{ м}^3/4,1855 \text{ МДж}$ или $\text{м}^3/1000 \text{ ккал}$); L^3 ;
- $V_{\text{сух}}$ — объем сухих продуктов сгорания, м^3 ; L^3 ;
- $V_{\text{теор}}$ — объем влажных продуктов сгорания при нормальных условиях, образующихся при сжигании 1 м^3 (кг) топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, м^3 ; L^3 ;
- V — объем продуктов сгорания, м^3 , либо расход продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{ч}$; м^3 в единицу времени, L^3 ; L^3T^{-1} ;
- $V_{\text{H}_2\text{O}}$ — объем водяных паров в продуктах сгорания 1 кг топлива или 1 м^3 газа, $\text{м}^3/\text{кг}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$; L^3M^{-1} ;
- W^a — содержание влаги в аналитической пробе, %;
- W^r — то же, в рабочем топливе, %;
- y — толщина пластического слоя, мм; L ;
- α — коэффициент расхода воздуха — отношение количества подаваемого воздуха L_{α} к теоретически необходимому для сжигания топлива $L_{\text{теор}}$;
- ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$; $L^{-3}M$;
- $\rho_{\text{пр.г}}$ — плотность продуктов сгорания топлива при нормальных условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$; $L^{-3}M$;
- η — коэффициент использования тепла топлива (КИТ).

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВА

Из существующих топлив в настоящее время наибольшее распространение получили топлива: газообразное, в особенности природный и смесь коксового и доменного газов, а также жидкое. Твердое топливо в печах сейчас применяют главным образом в виде пылевых взвесей и для получения генераторного газа. Поэтому в гл. VII даны лишь основные свойства некоторых видов твердого топлива.

ГАЗООБРАЗНЫЕ ТОПЛИВА

Таблица VII-1

Характеристика топлив и их составляющих

Название вещества, химическая формула	Молекулярная масса M , кг/моль	Плотность ρ , кг/м ³	Газовая постоянная R , Дж/(кг·°C)	Теплота сгорания			
				$Q_V^{об}$	$Q_H^{об}$	$Q_V^{мас}$	$Q_H^{мас}$
				кДж/м ³		кДж/кг	
Углерод при сгорании до CO (C)	12,01	—	—	—	—	9295	9295
Углерод при сгорании до CO ₂ (C)	12,01	—	—	—	—	32908	32908
Окись углерода (CO)	28,01	1,25	297	12644	12644	10132	10132
Водород (H ₂)	2,016	0,09	412	12770	10760	141974	119617
Метан (CH ₄)	16,04	0,717	518	39853	35797	56103	49404
Этан (C ₂ H ₆)	30,07	1,34	276	70422	64351	51958	47436
Пропан (C ₃ H ₈)	44,09	1,96	187	101823	93573	50409	46348
Бутан (C ₄ H ₁₀)	58,12	2,59	143	134019	123552	49572	45720
Пентен (C ₅ H ₁₀)	70,13	3,13	—	150723	140928	48575	45025
Пентан (C ₅ H ₁₂)	72,14	3,22	115	148213	137143	48358	44661
Бензол (C ₆ H ₆)	78,11	3,48	—	146287	140383	42035	40340
Этилен (C ₂ H ₄)	28,05	1,25	296	64016	14320	50786	47562
Пропилен (C ₃ H ₆)	42,08	1,88	198	94370	88216	49279	46055
Бутилен (C ₄ H ₈)	56,10	2,50	148	114509	107015	48692	45469
Ацетилен (C ₂ H ₂)	26,03	1,16	320	58992	56940	50367	48651
Сероводород (H ₂ S)	34,07	1,52	242	25707	23697	16705	15407
Сера (S)	32,06	—	—	—	—	9261	9261

Название вещества, химическая формула	Жаропроницаемость $t_{ж}^{\circ C}$	Необходимый объем воздуха $L_{теор}^{\text{м}^3}$	Количество продуктов сгорания, м^3 , образующихся при сжигании 1 м^3 горючего				Необходимый объем воздуха $P^{\text{м}^3}$
			CO_2	H_2O	N_2	всего	
Углерод при сгорании до CO (C)	—	—	—	—	—	—	4,455
Углерод при сгорании до CO_2 (C)	2190	—	—	—	—	—	8,9
Окись углерода (CO)	2378	2,386	1,00	—	1,886	2,880	1,909
Водород (H_2)	2240	2,386	—	1,00	1,886	2,886	26,467
Метан (CH_4)	2042	9,542	1,0	2,0	7,542	10,542	13,333
Этан (C_2H_6)	2051	16,647	2,0	3,0	13,17	18,17	12,95
Пропан (C_3H_8)	2107	23,86	3,0	4,0	18,82	25,82	12,43
Бутан (C_4H_{10})	2117	30,97	4,0	5,0	24,47	33,47	11,48
Пентен (C_5H_{10})	2189	35,70	—	—	—	38,20	—
Пентан (C_5H_{12})	2120	38,11	5,0	6,0	—	41,1	12,49
Бензол (C_6H_6)	2258	35,70	—	—	30,11	37,20	—
Этилен (C_2H_4)	2285	14,31	2,0	2,0	11,31	15,31	11,44
Пропилен (C_3H_6)	2318	21,43	3,0	3,0	16,93	22,93	11,49
Бутилен (C_4H_8)	2210	28,58	4,0	4,0	22,58	30,58	12,04
Ацетилен (C_2H_2)	2620	11,93	2,0	1,0	9,43	12,43	10,71
Сероводород (H_2S)	—	7,14	1SO_2	1,0	5,64	7,64	4,88
Сера (S)	—	—	—	—	—	—	3,33

Название вещества, химическая формула	Количество продуктов сгорания, м^3 , образующихся при сжигании 1 кг горючего				Коэффициент вязкости η , $\text{мкН}\cdot\text{с}/\text{м}^2$	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$
	CO_2	H_2O	N_2	всего		
Углерод при сгорании до CO (C)	1,87 CO	—	3,52	5,39	—	—
Углерод при сгорании до CO_2 (C)	1,87	—	7,04	8,9	—	—
Окись углерода (CO)	0,800	—	1,509	2,309	17,26	13,01
Водород (H_2)	—	11,09	20,9	32,0	8,73	97,01
Метан (CH_4)	1,397	2,795	10,54	14,73	10,30	14,36
Этан (C_2H_6)	1,55	2,33	10,23	14,11	8,63	6,43
Пропан (C_3H_8)	1,56	2,08	9,82	13,47	—	—
Бутан (C_4H_{10})	1,48	1,85	9,07	12,41	7,94	3,06
Пентен (C_5H_{10})	—	—	—	—	—	—
Пентан (C_5H_{12})	1,64	1,87	9,87	13,47	—	—
Бензол (C_6H_6)	—	—	—	—	—	—
Этилен (C_2H_4)	1,599	1,59	9,04	12,24	9,51	7,61
Пропилен (C_3H_6)	1,56	1,56	8,84	11,98	—	—
Бутилен (C_4H_8)	1,68	1,68	9,51	12,88	—	—
Ацетилен (C_2H_2)	1,79	0,89	8,47	11,16	0,41	8,10
Сероводород (H_2S)	0,68 SO_2	0,68	3,36	5,23	11,77	7,74
Сера (S)	0,7 SO_2	—	2,64	3,34	—	—

Таблица VII-2

Некоторые характеристики горючих газов

Название газа, химическая формула	Температура сжатия при $p=101325 \text{ Н/м}^2$, °С	Объем сухих продуктов сгорания на 1 м^3 газа $V_{\text{сух}}$, м^3	Удельная энтальпия, кДж/м ³		Отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания B	Максимальное содержание CO_2 при сжигании газа в воздухе CO_2^{max} , %
			i_v	$i_{v\text{сух}}$		
Оксид углерода (CO)	—	2,88	4375	4375	1,00	34,7
Водород (H_2)	—	1,88	3747	5736	0,65	—
Метан (CH_4)	—162	8,52	3391	4187	0,81	11,8
Этан (C_2H_6)	—89	15,16	3517	4187	0,84	13,2
Пропан (C_3H_8)	—42	21,80	3538	4187	0,84	13,8
Бутан (C_4H_{10})	—1	28,44	3559	4187	0,85	14,0
Пентан (C_5H_{12})	+36	35,08	3559	4187	0,85	14,2
Этилен (C_2H_4)	—104	13,28	3873	4459	0,87	15,0
Пропилен (C_3H_6)	—48	19,92	3768	4312	0,87	15,0
Пентен (C_5H_{10})	+30	33,20	3705	4250	0,87	15,0
Бензол (C_6H_6)	+80	34,20	3768	4124	0,92	17,5
Ацетилен (C_2H_2)	—	11,40	4522	4898	0,92	17,5
Бутилен (C_4H_8)	—6	26,56	3726	4271	0,87	15,0

Таблица VII-3

Средние теплоемкости $c_{\text{ср}}$, кДж/(м³·°С), и удельные энтальпии i , кДж/м³, продуктов сгорания доменного газа [$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 3977-4396$ кДж/м³ (950—1050 ккал/м³)]

Избыток воздуха, %	Значения $c_{\text{ср}}$ и i при температуре, °С				
	0	200	400	600	800
0	1,369; 0	1,407; 281,4	1,445; 577,8	1,482; 889,3	1,520; 1215,8
20	1,365; 0	1,403; 280,5	1,440; 576,1	1,478; 886,8	1,516; 1212,5
40	1,356; 0	1,390; 277,2	1,428; 571,1	1,467; 876,7	1,499; 1199,1
100	1,348; 0	1,382; 276,3	1,451; 566,1	1,449; 869,2	1,482; 1185,7

Продолжение табл. VII-3

Избыток воздуха, %	Значения $c_{\text{ср}}$ и i при температуре, °С			
	1000	1200	1400	1600
0	1,557; 1557,5	1,599; 1919,2	1,637; 2291,8	1,674; 2679,6
20	1,553; 1553,3	1,591; 1909,2	1,629; 2280,1	1,666; 2666,2
40	1,532; 1532,4	1,570; 1884,1	1,604; 2245,0	1,641; 2626,0
100	1,516; 1515,6	1,549; 1858,9	1,583; 2215,6	1,616; 2585,8

Продолжение табл. VII-3

Избыток воздуха, %	Значения $c_{\text{ср}}$ и i при температуре, °С			
	1800	2000	2200	2500
0	1,712; 3082,3	1,754; 3508,5	1,792; 3942,3	1,851; 4626,4
20	1,704; 3067,2	1,742; 3483,4	1,779; 3914,6	1,838; 4595,0
40	1,675; 3014,5	1,712; 3424,8	1,746; 3841,0	1,800; 4500,8
100	1,650; 2969,3	1,683; 3366,2	1,717; 3776,5	1,767; 4417,1

Таблица VII-4

Средние теплоемкости $c_{ср}$, кДж/(м³·°С), и удельные энтальпии i , кДж/м³, продуктов сгорания смеси ($Q_H^P = 8370$ кДж/м³ коксового и доменного газов с теплотой сгорания коксового газа (30,3%) $Q_H^P = 18000$ кДж/м³ и доменного газа (69,7%) $Q_H^P = 4200$ кДж/м³

Избыток воздуха, %	Значения $c_{ср}$ и i при температуре, °С				
	0	200	400	600	800
0	1,365; 0	1,398; 279,7	1,432; 572,8	1,469; 881,7	1,503; 1202,4
20	1,361; 0	1,394; 278,8	1,428; 571,1	1,461; 876,7	1,495; 1195,8
40	1,352; 0	1,382; 276,3	1,415; 506,1	1,444; 866,7	1,474; 1179,0
100	1,336; 0	1,365; 279,9	1,394; 557,7	1,424; 854,1	1,453; 1162,3

Продолжение табл. VII-4

Избыток воздуха, %	Значения $c_{ср}$ и i при температуре, °С			
	1000	1200	1400	1600
0	1,537; 1536,6	1,570; 1884,1	1,608; 2250,8	1,641; 2628,9
20	1,528; 1528,2	1,562; 1874,0	1,595; 2233,2	1,629; 2605,9
40	1,507; 1507,3	1,537; 1843,9	1,570; 2198,1	1,599; 2558,9
100	1,482; 1482,1	1,516; 1818,8	1,545; 2162,9	1,574; 2518,8

Продолжение табл. VII-4

Избыток воздуха, %	Значения $c_{ср}$ и i при температуре, °С			
	1800	2000	2200	2500
0	1,675; 3014,5	1,712; 3424,8	1,746; 3840,9	1,800; 4500,8
20	1,662; 2991,8	1,696; 3391,3	1,729; 3804,1	1,779; 4448,5
40	1,629; 2931,6	1,662; 3324,3	1,691; 3721,2	1,742; 4354,3
100	1,604; 2886,4	1,634; 3265,7	1,662; 3656,8	— ; 4270,5

Таблица VII-5

Средние теплоемкости $c_{ср}$, кДж/(м³·°С), и удельные энтальпии i , кДж/м³, продуктов сгорания смеси $Q = 10450$ кДж/м³ коксового и доменного газов с теплотой сгорания коксового газа (45,5%) $Q = 18000$ кДж/м³ и доменного газа (54,5%) $Q_H^P = 4200$ кДж/м³

Избыток воздуха, %	Значения $c_{ср}$ и i при температуре, °С				
	0	200	400	600	800
0	1,365; 0	1,398; 279,7	1,432; 572,8	1,466; 879,2	1,499; 1199,1
20	1,357; 0	1,390; 278,0	1,424; 569,4	1,457; 874,2	1,491; 1192,4
40	1,348; 0	1,377; 275,5	1,407; 562,7	1,436; 861,6	1,491; 1172,3
100	1,336; 0	1,365; 272,9	1,394; 557,7	1,424; 854,1	1,453; 1162,3

Избыток воздуха, %	Значения c_{cp} и i при температуре, °С			
	1000	1200	1400	1600
0	1,532; 1532,4	1,570; 1884,1	1,603; 2244,9	1,637; 2619,3
20	1,519; 1519,8	1,553; 1863,9	1,587; 2221,5	1,620; 2592,5
40	1,495; 1494,7	1,524; 1828,8	1,553; 2174,6	1,583; 2532,2
100	1,482; 1482,1	1,511; 1813,7	1,541; 2157,0	1,570; 2512,1

Избыток воздуха, %	Значения c_{cp} и i при температуре, °С			
	1800	2000	2200	2500
0	1,671; 3006,9	1,704; 3408,1	1,742; 3831,8	1,792; 4479,9
20	1,654; 2976,8	1,683; 3366,2	1,717; 3776,5	1,767; 4417,1
40	1,612; 2901,4	1,641; 3282,5	1,671; 3675,2	1,717; 4291,5
100	1,599; 2878,8	1,629; 3257,3	1,658; 3647,5	1,699; 4249,6

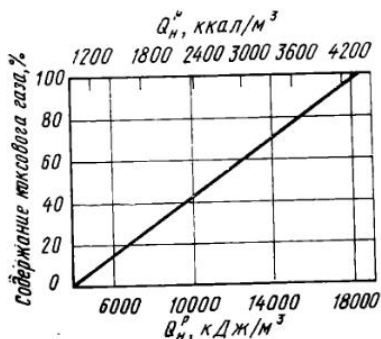


Рис. 52. Зависимость содержания коксового газа в смеси коксового и доменного газов от теплоты сгорания смеси Q_H^p . Для коксового газа $Q_H^q = 18210$ кДж/м³; для доменного газа $Q_H^q = 3894$ кДж/м³

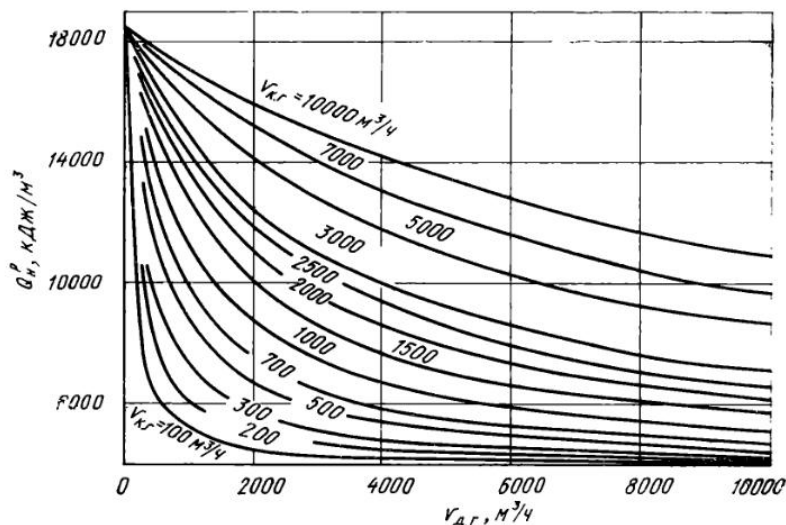


Рис. 53. Зависимость теплоты сгорания Q_p^D (газовой смеси) от соотношения расходов коксового $v_{к.г}$ ($Q_H = 18210$ кДж/м³) и доменного $v_{д.г}$ ($Q_H = 3894$ кДж/м³) газов

Таблица VII-6

Средние теплоемкости $c_{ср}$, кДж/(м³·°C), и удельные энтальпии i , кДж/м³, продуктов сгорания коксового газа $Q_H^D = 18000$ кДж/м³ при различных температурах

Избыток воздуха, %	Значения $c_{ср}$ и i при температуре, °C				
	0	200	400	600	800
0	1,432; 0	1,474; 294,8	1,516; 606,3	1,562; 937,0	1,604; 1282,8
20	1,398; 0	1,436; 287,2	1,474; 589,5	1,571; 906,9	1,549; 1239,3
40	1,377; 0	1,411; 282,2	1,444; 577,8	1,482; 889,3	1,516; 1212,5
100	1,348; 0	1,377; 275,5	1,407; 562,7	1,436; 861,6	1,469; 1175,7

Продолжение табл. VII-6

Избыток воздуха, %	Значения $c_{ср}$ и i при температуре, °C			
	1000	1200	1400	1600
0	1,649; 1649,6	1,692; 2029,8	1,733; 2426,7	1,779; 2847,0
20	1,587; 1586,8	1,629; 1954,4	1,666; 1076,8	1,704; 2726,4
40	1,549; 1549,1	1,587; 1904,2	1,620; 2268,4	1,654; 2646,1
100	1,499; 1498,8	1,528; 1833,8	1,562; 2186	1,591; 2545,6

Продолжение табл. VII-6

Избыток воздуха, %	Значения $c_{ср}$ и i при температуре, °C			
	1800	2000	2200	2500
0	1,821; 3278,3	1,863; 3726,3	1,909; 4200,2	1,976; 4940,4
20	1,742; 3135,1	1,779; 3558,8	1,817; 3997,6	1,876; 4689,2
40	1,691; 3086,5	1,725; 3449,9	1,758; 3868,6	1,813; 4536,4
100	1,620; 2916,5	1,649; 3299,2	1,683; 3702,8	1,729; 4322,9

6* Таблица VII-7
Характеристика генераторных газов

Исходное топливо	Состав генераторного газа, % (объемн.)							Плотность при нормальных условиях ρ , кг/м ³	Теплота сгорания сухого топлива Q_H , кДж/м ³
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C _m H _n	N ₂ *	H ₂ S		
Антрацит донецкий	5,5	27,5	13,5	0,5	—	52,6	0,2	1,135	5150
Богословский уголь	8,0	24,0	13,6	2,2	0,3	51,7	—	1,142	5455
Газовый донецкий уголь	5,0	26,5	13,5	2,3	0,3	51,9	0,3	1,122	5870
Северодонецкий уголь	7,0	25,0	15,0	2,5	0,3	49,0	1,0	1,119	6075
Черемховский уголь	7,0	25,5	15,5	2,6	0,4	48,7	0,1	1,110	6079
Целябинский уголь	5,0	30,0	13,0	2,0	0,2	49,4	0,2	1,128	6067
Подмосковный уголь	6,5	25,0	14,0	2,2	0,3	50,6	1,2	1,130	5908
Коксовая мелочь	5,0	28,5	13,0	0,7	—	52,4	0,2	1,136	5296
Торф машинноформовочный	8,0	28,0	15,0	3,0	0,4	45,3	0,1	1,126	6281
Гидроторф	8,5	27,5	15,0	2,5	0,4	45,8	0,1	1,127	6243
Древесина (щепа)	6,5	29,0	14,0	3,0	0,4	46,9	—	1,122	6477

* Содержание кислорода во всех газах 0,2%.

Таблица VII-8

Средний состав некоторых нефтепромысловых (попутных) газов

Месторождение	Состав газа, % (объемн.)											Низшая теплота сгорания Q_H , кДж/м ³	Плотность ρ , кг/м ³
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₄ H ₆	C ₄ H ₁₂	C ₄ H ₁₄	H ₂ S	CO ₂	N ₂		
Туймазинское	30,0	13,0	14,3	6,3	—	3,3	1,4	0,7	1,0	30,0	46892	1,293	
Мухановское	39,5	20,0	18,5	7,7	—	2,8	1,4	—	0,1	10,0	59453	1,293	
Ромашкинское	42,7	15,0	11,0	8,0	—	4,0	—	—	1,5	3,0	55433	1,165	
Шугуровское	40,0	20,0	19,5	9,5	—	2,9	—	—	0,2	5,2	61337	1,293	
Бакинское	23,7	12,0	10,0	7,5	—	3,8	1,1	—	0,1	10,0	59536	1,423	
Грозненское	67-99	0-10,1	1-3,2	0,1-3,2	0,2-1,7	1,5	1,0	—	0-25,0	46,0	32783	1,293	
Майкопское	53-81	2,5-8,1	2,8-12,9	6-17,0	5,6-8,1	—	—	—	0,7	3,0	35169	0,71-1,1	
Казახское	67-96	0,7-10,9	0,3-3,0	0,5-6,7	2,3-6,3	—	—	—	0-6,4	—	39356	1,07-1,45	
Сызранское	60-95	1-16,0	0,2-12,7	0,1-7,5	0,1-3,8	—	—	—	0-3,8	1,6	35169-54010	0,84-1,2	
Кинельское	29	15,8	15,8	15,8	—	—	—	—	3,5	20,1	48148	0,85-1,1	
Ишимбайское	64	9,2	7,0	5,3	3,3	—	—	—	0,5	8,4	47102	1,2	
Грузинское	42,4	12,0	20,5	7,2	3,1	—	—	—	1,0	11,0	51916	1,38	
	85,4	7,2	1,7	2,1	1,4	—	—	—	0,4	1,8	40193	0,87	

Таблица VII-9

Примерный состав сухих природных газов различных месторождений СССР

Месторождение	Состав, % (объем.)										Относительная масса (по отношению к воздуху)	Низшая теплота сгорания $Q_{н.к}$ кДж/м ³
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₇ H ₁₆	CO ₂	H ₂ S	N ₂		
Еланское (Саратовская обл.)	93,2	0,7	0,6	0,6	0,5	—	—	—	Следы	4,4	0,60	35169
Курдюмовское (Саратовская обл.)	92,2	0,8	—	1,0	—	—	—	—	—	6,0	0,59	34332
Бугурусланское	77,8	4,4	1,7	0,8	0,6	—	—	—	—	13,5	0,69	34122
Газлинское (Бухара — Урал)	94,16	2,49	0,38	0,24	—	—	—	0,13	—	2,6	—	—
Краснодарское	90,8	5,4	1,2	0,3	0,7	—	—	0,6	—	1,0	—	—
Иранское	83,41	12,16	3,45	0,97	0,01	—	—	—	—	—	—	—
Мирнское (Ставропольский край)	83,05	9,13	1,42	0,54	0,46	—	4,09	—	—	1,31	—	—
Средняя Азия — Центр	93,5	3,3	0,5	0,3	0,2	—	0,5	—	—	1,7	—	—
Игримско-Березовское	94,66	1,81	0,41	0,17	0,1	—	0,57	—	—*	2,26	—	—
Карадагский газ (после ГБЗ)	96,6	2,9	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Усть-Видюйское	94,8	2,3	0,9	0,5	0,3	—	0,2	—	—	1,0	—	—
Медвежье	98,5	0,08	0,003	0,001	—	—	0,1	—	—*	1,3	—	—
Северо-Сахалинские месторождения	90,4	1,9	1,1	0,6	0,2	—	4,7	—	—	1,1	—	—
Оренбургское	85,78	4,84	1,48	0,586	0,452	—	0,581	—	—	4,95**	—	—
Оренбургское (после ГПЗ)	88,03	4,79	1,46	0,523	0,285	—	—	—	—	—	—	—
Южно-Дагестанское	86,5	3,0	0,9	0,1	—	—	7,3	—	—	2,2	0,65	33913
Мелитопольское	98,0	—	—	—	—	—	0,2	—	—	1,8	0,57	35378
Ухтинское	88,0	1,9	0,2	0,3	—	—	0,3	—	—	9,3	0,61	31610
Тульское, Краснодарского края	97,8	0,4	—	0,3	—	—	0,2	—	—	1,3	0,58	35588
Мельниково, Саратовской обл.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
западное поле	55,0	—	—	—	—	—	0,2	—	—	44,8	0,72	19887
восточное поле	88,0	0,2	—	—	—	—	0,1	—	—	11,7	0,62	31401
Ставрополь Кавказский:	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
северное поле	97,7	—	—	—	—	—	0,7	—	—	1,6	0,57	35169
южное поле	60,0	—	—	—	—	—	—	—	—	40,0	0,70	21771
Меловые горы (Новоросийск)	94,4	—	—	—	—	—	0,6	—	—	5,0	0,58	34960
Западная Украина:	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Калуш	95,7	—	—	—	—	—	0,1	—	—	4,2	0,58	34332
Дашава	97,8	0,5	0,2	0,1	0,05	—	0,05	—	—	1,3	0,57	36006
Косов	75,7	21,3	1,4	1,6	—	—	—	—	—	—	0,68	42705
Опары	89,0	9,1	—	1,9	—	—	—	—	—	—	0,62	39565

Месторождение	Состав, % (объемн.)										Относительная масса (по отношению к воздуху)	Нижшая теплота сгорания Q_n^P , кДж/м ³
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C _m H _n	CO ₂	H ₂ S	N ₂				
Арчдинское	99,4	0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	0,56	35923
Шебелинское:												
I	93,5	4,0	1,0	0,5	0,5	0,1	—	0,4	—	—	0,61	38225
II*	89,9	3,1	0,9	0,4	—	—	—	5,2	—	—	0,61	35462
III*	92,6	4,21	0,9	0,79	—	0,15	—	1,4	—	—	0,61	37639

* По данным отдельных анализов. ** 0,02 H₂, ** 0,02 He. ** 0,06 Ne.

Таблица VII-10

Средний состав и теплотехнические характеристики природных газов

Месторождение, горизонт	Состав газа, % (объемн.)										Нижшая теплота сгорания Q_n^P , кДж/м ³	Обменная масса по воздуху	Теоретический объем воздуха $L_{теор}$, м ³ /м ³	Теоретический объем сухих продуктов сгорания $V_{сух}$, м ³ /м ³	Теоретический объем влажных продуктов сгорания $V_{теор}$, м ³ /м ³	Отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания, b	Теплота сгорания, отнесенная к 1 м ³ сухих продуктов сгорания $q_{сух}$, кДж/м ³	Теплота сгорания, отнесенная к 1 м ³ влажных продуктов сгорания $q_{в}$, кДж/м ³	Теплота сгорания, отнесенная к 1 м ³ сухих продуктов сгорания (при сжигании в воздухе) $Q_{сух}$, кДж/м ³	Теплота сгорания, отнесенная к 1 м ³ влажных продуктов сгорания (при сжигании в воздухе) $Q_{в}$, кДж/м ³	Карпропроизводительность (при сжигании в воздухе, содержащем 1% влаж. газа по весу) $g_{ж}$, °C	Карпропроизводительность Q_{2} сухих продуктов сгорания, %
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S														
Ставропольское:																						
Халудский	98,7	0,35	0,12	0,06	—	0,1	0,67	—	—	—	35713	0,56	9,5	10,5	0,81	4187	3412	2040	2010	11,8		
Зеленая свита	85,0	4,4	2,4	1,8	1,3	0,1	5,0	—	—	—	38365	0,67	10,4	11,5	0,82	4187	3412	2040	2010	12,2		
Верейский	98,5	0,5	0,1	—	—	—	0,9	—	—	—	35713	0,56	9,5	10,5	0,81	4187	3412	2040	2010	11,8		
Елданское месторождение Саратовской обл.:																						
Верейский горизонт	94,0	1,8	0,4	0,1	0,1	0,1	3,5	—	—	—	35337	0,59	9,4	10,4	0,81	4187	3391	2030	2000	11,8		
Девонский горизонт	95,1	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5	—	—	—	37807	0,60	10,0	11,1	0,81	4187	3412	2040	2010	12,0		
Бугурусланское	81,7	5,0	2,0	1,2	0,6	0,4	8,5	0,6	—	—	36718	0,66	9,7	10,8	0,81	4145	3391	2030	2000	12,0		
Дашавское (УССР)	98,3	0,3	0,12	0,15	—	0,1	1,03	—	—	—	35672	0,56	9,5	10,5	0,81	4187	3412	2040	2010	11,8		
Шебелинское (УССР)	93,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,1	0,4	—	—	—	38225	0,64	10,4	11,2	0,81	4187	3412	2040	2010	12,0		

Таблица VII-11

Константы равновесия реакций диссоциации и конверсии метана

Температура, °К	$\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 2\text{H}_2$
298	$1,263 \cdot 10^{-9}$	$1,203 \cdot 10^{-17}$	$1,249 \cdot 10^{-24}$	$1,158 \cdot 10^{-30}$
400	$3,179 \cdot 10^{-6}$	$2,333 \cdot 10^{-16}$	$3,610 \cdot 10^{-13}$	$1,507 \cdot 10^{-19}$
500	$3,737 \cdot 10^{-4}$	$8,284 \cdot 10^{-11}$	$1,137 \cdot 10^{-8}$	$6,037 \cdot 10^{-13}$
600	$9,991 \cdot 10^{-3}$	$4,808 \cdot 10^{-7}$	$1,359 \cdot 10^{-5}$	$1,701 \cdot 10^{-8}$
700	0,112	$2,557 \cdot 10^{-4}$	$2,407 \cdot 10^{-3}$	$2,717 \cdot 10^{-5}$
800	0,713	$2,983 \cdot 10^{-2}$	0,126	$7,071 \cdot 10^{-3}$
900	3,096	1,247	2,864	0,543
1000	10,200	25,20	36,070	17,60
1100	27,400	$2,998 \cdot 10^2$	$2,941 \cdot 10^2$	$3,036 \cdot 10^2$
1200	62,760	$2,360 \cdot 10^3$	$1,717 \cdot 10^3$	$3,245 \cdot 10^3$
1300	$1,271 \cdot 10^2$	$1,360 \cdot 10^4$	$7,695 \cdot 10^3$	$2,404 \cdot 10^4$
1400	$2,331 \cdot 10^2$	$6,098 \cdot 10^4$	$2,800 \cdot 10^4$	$1,328 \cdot 10^5$
1500	$3,954 \cdot 10^2$	$2,241 \cdot 10^5$	$8,622 \cdot 10^4$	$5,824 \cdot 10^5$
1600	$6,282 \cdot 10^2$	$6,987 \cdot 10^5$	—	$2,109 \cdot 10^6$
1700	$9,452 \cdot 10^2$	$1,903 \cdot 10^6$	—	$6,537 \cdot 10^6$
1800	$1,362 \cdot 10^3$	$4,639 \cdot 10^6$	$1,209 \cdot 10^5$	$1,778 \cdot 10^7$
1900	$1,887 \cdot 10^3$	$1,028 \cdot 10^7$	$2,432 \cdot 10^6$	$3,344 \cdot 10^7$
2000	$2,530 \cdot 10^3$	$2,100 \cdot 10^7$	$4,565 \cdot 10^6$	$9,659 \cdot 10^7$
2100	$3,296 \cdot 10^3$	$3,986 \cdot 10^7$	$8,027 \cdot 10^6$	$1,980 \cdot 10^8$
2200	$4,189 \cdot 10^3$	$7,133 \cdot 10^7$	$1,345 \cdot 10^7$	$1,782 \cdot 10^8$
2300	$5,221 \cdot 10^3$	$1,213 \cdot 10^8$	$2,157 \cdot 10^7$	$6,820 \cdot 10^8$
2400	$6,538 \cdot 10^3$	$2,016 \cdot 10^8$	$3,400 \cdot 10^7$	$1,169 \cdot 10^9$
2500	$7,689 \cdot 10^3$	$3,073 \cdot 10^8$	$4,941 \cdot 10^7$	$1,911 \cdot 10^9$

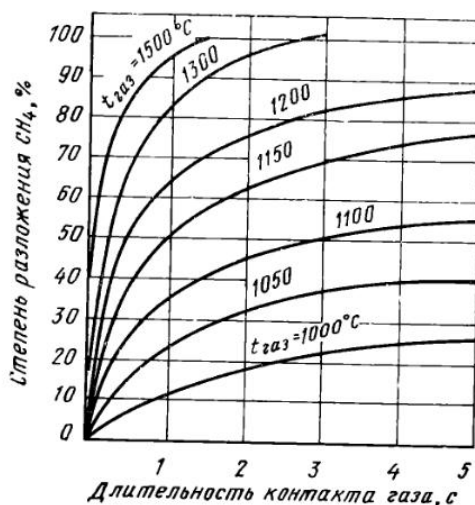
Рис. 54. Зависимость степени разложения метана от температуры и длительности τ_к контактирования с поверхностью нагрева

Таблица VII-12

Состав газовой смеси, образующейся по реакции $\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$, % (объемн.)

Температура, °С	CH ₄	H ₂
300	96,90	3,10
400	86,16	13,84
475	69,86	30,14
500	62,53	37,47
506	60,71	39,29
536	51,16	48,84
550	46,69	53,31
567	41,26	58,74
600	31,68	68,32
700	11,07	88,93
800	4,41	95,59
1000	0,50	99,50
1100	0,20	99,80

Таблица VII-13

Состав равновесной смеси при реакции $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$ (по Будуару), % (объемн.)

Температура, °C	При установившемся равновесии в опыте	
	CO	CO ₂
445	0,6	99,4
550	10,7	89,3
650	39,8	60,2
800	93,0	7,00
925	96,0	4,0

Таблица VII-14

Равновесный состав воздушного газа, % (объемн.)

Температура, °C	CO ₂	CO	N ₂	$\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot 100$
650	10,8	16,9	72,3	61,0
800	1,6	31,9	66,5	95,2
900	0,4	34,1	65,5	98,8
1000	0,2	34,4	65,4	99,8

Таблица VII-15

Уравнение констант равновесия реакций

Реакция	Константы равновесия K	Уравнения констант равновесия
$\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$	$\frac{(\text{CO}_2)}{(\text{O}_2)}$	$\lg K = \frac{-20582,8}{T} - 0,302 \lg T + 1,43 \cdot 10^{-4} T - 2,4 \cdot 10^{-8} T^2 + 0,622$
$2\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$	$\frac{(\text{CO})^2}{(\text{O}_2)}$	$\lg K = \frac{-11635,1}{T} + 2,1656 \lg T - 9,4 \cdot 10^{-4} T + 8,76 \cdot 10^{-7} T^2 + 3,394$
$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$	$\frac{(\text{CO}_2)^2}{(\text{O}_2)(\text{CO})^2}$	$\lg K = \frac{-29530,5}{T} - 2,769 \lg T + 0,001225 T - 1,356 \cdot 10^{-7} T^2 - 2,15$
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	$\frac{(\text{H}_2\text{O})^2}{(\text{H}_2)^2(\text{O}_2)}$	$\lg K = \frac{-25116,1}{T} - 0,9466 \lg T - 7,216 \cdot 10^{-4} T + 1,618 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,714$
$\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$	$\frac{(\text{CO})^2}{(\text{CO}_2)}$	$\lg K = \frac{-8947,7}{T} + 2,4675 \lg T - 0,0010824 T + 1,16 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,772$
$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$	$\frac{(\text{CO})(\text{H}_2)}{(\text{H}_2\text{O})}$	$\lg K = \frac{-6740,5}{T} + 1,5561 \lg T - 1,092 \cdot 10^{-4} T - 3,71 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,554$
$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	$\frac{(\text{CO}_2)(\text{H}_2)^2}{(\text{H}_2\text{O})^2}$	$\lg K = \frac{-4533,3}{T} + 0,6446 \lg T + 3,646 \cdot 10^{-4} T - 1,858 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,336$
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$\frac{(\text{CO}_2)(\text{H}_2)}{(\text{CO})(\text{H}_2\text{O})}$	$\lg K = \frac{-2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 0,09738 T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098$
$\text{C} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4$	$\frac{(\text{CH}_4)}{(\text{H}_2)^2}$	$\lg K = \frac{-3348}{T} - 5,957 \lg T + 0,00186 T + 1,095 \cdot 10^{-7} T^2 + 11,79$

Таблица VII-16

Логарифмы констант равновесия реакций при различной температуре, К

Реакция	500	1000	1500	2000	Реакция	500	1000	1500	2000
$C_3 + O_2 \rightleftharpoons CO_2$	41,040	20,418	13,545	10,106	$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	-6,790	0,335	2,755	3,954
$2C + O_2 \rightleftharpoons 2CO$	32,063	20,673	16,815	14,830	$C + 2H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2$	-4,603	0,415	2,240	3,183
$2CO + O_2 \rightleftharpoons 2CO_2$	50,017	20,163	10,275	5,382	$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$	-2,31	0,20	0,40	0,62
$2H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2H_2O$	46,643	20,003	11,305	6,932	$C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$	3,312	-0,982	-2,351	-2,918
$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$	-8,977	0,255	3,270	4,724					

Таблица VII-17

Степень диссоциации водяного пара, %

t, °C	Парциальное давление водяного пара, кН/м²																								
	2,94	3,93	4,90	5,88	6,86	7,85	8,83	9,81	11,77	13,73	15,69	17,65	19,61	24,52	29,42	34,32	39,23	44,13	49,03	58,84	68,65	78,75	88,26	98,07	
1600	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38	0,35	0,32	0,30	0,29	0,28	0,27
1700	1,60	1,45	1,27	1,21	1,16	1,11	1,08	1,05	1,02	0,99	0,96	0,93	0,90	0,87	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,66	0,63	0,60	0,57	0,54
1800	2,70	2,40	2,25	2,10	2,00	1,90	1,85	1,80	1,70	1,60	1,53	1,46	1,40	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86	0,83	0,80
1900	4,45	4,05	3,80	3,60	3,40	3,25	3,10	3,00	2,85	2,70	2,60	2,50	2,40	2,20	2,10	2,00	1,90	1,80	1,70	1,63	1,56	1,50	1,45	1,40	1,35
2000	6,30	5,75	5,35	5,05	4,80	4,60	4,45	4,30	4,00	3,80	3,55	3,50	3,40	3,15	2,95	2,80	2,65	2,57	2,50	2,40	2,30	2,20	2,10	2,00	1,90
2100	9,35	8,55	7,95	7,50	7,10	6,80	6,55	6,35	6,00	5,70	5,45	5,25	5,10	4,80	4,55	4,30	4,10	3,90	3,70	3,55	3,40	3,25	3,10	3,00	2,90
2200	13,4	12,3	11,5	10,8	10,3	9,90	9,60	9,30	8,80	8,35	7,95	7,65	7,40	6,90	6,50	6,25	5,90	5,65	5,40	5,10	4,90	4,70	4,55	4,40	4,30
2300	17,5	16,0	15,4	15,0	14,3	13,7	13,3	12,9	12,2	11,6	11,1	10,7	10,4	9,6	9,1	8,7	8,4	8,0	7,7	7,3	6,9	6,7	6,4	6,2	6,0
2400	24,4	22,5	21,0	20,0	19,1	18,4	17,7	17,2	16,3	15,6	15,0	14,4	13,9	13,0	12,2	11,7	11,2	10,8	10,4	9,9	9,4	9,0	8,7	8,4	8,0
2500	30,9	28,5	26,8	25,6	24,5	23,5	22,7	22,1	20,9	20,0	19,3	18,6	18,0	16,8	15,9	15,2	14,6	14,1	13,7	12,9	12,3	11,7	11,3	11,0	10,5
2600	39,7	37,1	35,1	33,5	32,1	31,0	30,1	29,2	27,8	26,7	25,7	24,8	24,1	22,6	21,5	20,5	19,7	19,1	18,5	17,5	16,7	16,0	15,5	15,0	14,5
2700	47,3	44,7	42,6	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	34,2	33,0	31,8	30,8	29,9	28,2	26,8	25,7	24,8	24,0	23,3	22,1	21,1	20,3	19,6	19,0	18,5
2800	57,6	54,5	52,2	50,3	48,7	47,3	46,1	45,0	43,2	41,6	40,4	39,3	38,3	36,2	34,6	33,3	32,2	31,1	30,2	28,8	27,6	26,6	25,8	25,0	24,0
2900	65,6	62,8	60,5	58,6	56,9	55,5	54,3	53,2	51,3	49,7	48,3	47,1	46,0	43,7	41,9	40,5	39,2	38,1	37,1	35,4	34,1	32,9	31,9	31,0	30,0
3000	72,9	70,6	68,5	66,8	65,1	63,8	62,6	61,6	59,6	58,0	56,6	55,4	54,3	51,9	50,0	48,4	47,0	45,8	44,7	42,9	41,4	40,1	39,0	38,0	37,0

Таблица VII-18

Степень диссоциации двуокиси углерода, %

t, °C	Парциальное давление двуокиси углерода, кН/м ²																								
	2,94	3,93	4,90	5,88	6,86	7,85	8,83	9,81	11,77	13,73	15,69	17,65	19,61	24,52	29,42	34,32	39,23	44,13	49,03	58,84	68,65	78,45	88,26	98,07	
1500	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1600	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9	0,85	0,83	0,83	0,79	0,75	0,72	0,70
1700	4,1	3,8	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,75	1,7	1,65	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3
1800	6,9	6,3	5,9	5,5	5,2	5,0	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,75	2,6	2,6	2,5	2,4	2,2	2,2
1900	11,1	10,1	9,5	8,9	8,5	8,1	7,8	7,6	7,2	6,8	6,5	6,3	6,1	5,6	5,3	5,1	4,9	4,7	4,5	4,3	4,1	3,9	3,7	3,6	3,6
2000	18,0	16,5	15,4	14,6	13,9	13,4	12,9	12,5	11,8	11,2	10,8	10,4	10,0	9,4	8,8	8,4	8,0	7,7	7,4	7,1	6,8	6,5	6,2	6,0	6,0
2100	25,9	23,9	22,4	21,3	20,3	19,6	18,9	18,3	17,3	16,6	15,9	15,3	14,9	13,9	13,1	12,5	12,0	11,5	11,2	10,5	10,1	9,7	9,3	9,0	9,0
2200	37,6	35,1	33,1	31,5	30,3	29,2	28,3	27,5	26,1	25,0	24,1	23,3	22,6	21,2	20,1	19,2	18,5	17,9	17,3	16,4	15,6	15,0	14,5	14,0	14,0
2300	47,6	44,7	42,5	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	34,3	32,9	31,8	30,9	30,0	28,2	26,9	25,7	24,8	24,0	23,2	22,1	21,1	20,3	19,6	19,0	19,0
2400	59,0	56,0	53,7	51,8	50,2	48,8	47,6	46,5	44,6	43,1	41,8	40,6	39,6	37,5	35,8	34,5	33,3	32,3	31,4	29,9	28,7	27,7	26,8	26,0	26,0
2500	69,1	66,3	64,1	62,2	60,6	59,3	58,0	56,9	55,0	53,4	52,0	50,7	49,7	47,3	45,4	43,9	42,6	41,4	40,4	38,7	37,2	36,0	34,9	34,0	34,0
2600	77,7	75,2	73,3	71,6	70,2	68,9	67,8	66,7	64,9	63,4	62,0	60,8	59,7	57,4	55,5	53,8	52,4	51,2	50,1	48,2	46,6	45,3	44,1	43,0	43,0
2700	84,4	82,5	81,1	79,8	78,6	77,6	76,6	75,7	74,1	72,8	71,6	70,5	69,4	67,3	65,5	63,9	62,6	61,3	60,3	58,4	56,8	55,4	54,1	53,0	53,0
2800	89,6	88,3	87,2	86,1	85,2	84,4	83,7	83,0	81,7	80,6	79,6	78,7	77,9	76,1	74,5	73,2	71,9	70,8	69,9	68,1	66,6	65,3	64,1	63,0	63,0
2900	93,2	92,2	91,4	90,6	90,0	89,4	88,8	88,3	87,4	86,5	85,8	85,1	84,5	83,0	81,8	80,7	79,7	78,8	78,0	76,5	75,2	74,0	73,0	72,0	72,0
3000	95,6	94,9	94,4	93,9	93,5	93,1	92,7	92,3	91,7	91,1	90,6	90,1	89,6	88,5	87,6	86,8	86,0	85,4	84,7	83,6	82,5	81,7	80,8	80,0	80,0

Таблица VII-19

Характеристика сжиженных газов

Газ, химическая формула	Плотность ρ		Температура кипения, °C	Теплоемкость газа, кДж/(кг·°C)		Объем паров на 1 кг жидкости, м ³	Теплота сгорания при 15°C и 101325 Н/м ² , кДж/м ³	Пределы воспламеняемости (% газа) в смеси		Температура воспламеняющая, °C
	газа, кг/м ³	жидкости, кг/л		при постоянном давлении	при постоянном объеме			высший	нижний	
Бутан (C ₄ H ₁₀)	2,593	0,582	+0,6	1,918	1,733	0,406	114718	8,4	1,9	475—550
Пропан (C ₃ H ₈)	1,967	0,509	-44,5	1,989	1,729	0,535	—	9,5	2,3	510—580
Этан (C ₂ H ₆)	1,340	0,446	-88,7	1,729	1,415	0,785	60675	12,5	3,2	530—605

Таблица VII-20

Состав и некоторые теплотехнические характеристики сжиженных газов

Газ	Состав газов, % (объемн.)															
	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₄ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₁₀	C ₂ H ₁₂	C ₄ H ₁₄	O ₂	N ₂
А	—	—	—	0,8	16,0	14,4	63,4	0,2	2,6	—	—	0,3	—	—	0,5	1,8
Б	—	—	0,3	—	—	3,5	90,7	0,1	3,8	—	—	0,5	0,7	—	—	0,4
В	0,2	—	1,5	—	—	12,7	61,2	—	14,5	1,4	—	—	—	—	—	8,5
Г	—	—	—	—	—	10,9	76,8	1,0	6,6	—	—	2,3	1,5	—	—	—
Д	0,4	0,9	0,4	—	—	7,7	71,1	0,5	11,5	—	—	1,8	—	—	—	4,9

Продолжение табл. VII-20

Газ	Теплота сгорания Q _н , кДж/м ³	Энтальпия сухих продуктов сгорания t _{сух} , кДж/м ³	Жаропроизводитель- ность t _ж , °С	Энтальпия продуктов сгорания t _в , кДж/м ³	Отношение сухих и влажных продуктов сгорания Б	Максимальное содержание СО ₂ в продуктах сгорания СО ₂ max, %
А	84238	4187	2120	3559	0,85	14,0
Б	92110	4144	2100	3517	0,85	13,7
В	80248	4166	2100	3517	0,85	13,8
Г	95040	4187	2100	3538	0,85	14,4
Д	89179	4187	2120	3559	0,85	14,0

**ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
НА «СЖАТЫЕ ГАЗЫ» (ПО ГОСТ 6763—53)**

«Сжатые газы» отпускаются в баллоны под давлением 19,6 МН/м² (200 кгс/см²).

Марки газов

Природный газ — из газовых и нефтяных скважин состава 70—98% (объемн.) CH₄, 1—10% C₂H₆, остальное — другие углеводороды; Q_H = 29300 кДж/м³.

Коксовый газ метанизированный, получаемый при извлечении водорода методом глубокого охлаждения, содержит ≥65% CH₄, Q_H = 25214 кДж/м³.

Коксовый газ обогащенный, получаемый после извлечения водорода методом глубокого охлаждения, состав: ≥50% CH₄, <12% H₂, Q_H = 22190 кДж/м³.

В «сжатых газах» должно содержаться, г/м³: <0,02 H₂S; <0,01 смолы и пыли; <1,0% O₂ (≤1,2% для коксового обогащенного). В пересчете на HCN <0,05 г/м³ цианистых соединений. Содержание влаги в газе, находящемся под давлением в баллоне, зимой ≤0,50 г/м³, летом ≤7,0 г/м³.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
НА СЖИЖЕННЫЙ
УГЛЕВОДОРОДНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ГАЗ
(ПО ГОСТ 10196—62)**

Сжиженные углеводородные топливные газы изготовляют трех марок:

- 1) пропан технический, состоящий в основном из пропана или из пропана и пропилена (≥93%);
- 2) бутан технический, состоящий в основном из бутана или из бутана и бутиленов (≥93%);
- 3) смесь пропана и бутана технических, состоящая в основном из пропана и бутана или из пропана, пропилена, бутана и бутиленов.

Содержание сероводорода в сжиженных газах не должно превышать 0,05 г/м³. Запах газа должен ощущаться при содержании в воздухе 0,5% газа. Избыточное давление насыщенных паров при +45°C для бутана технического должно составлять 0,4—0,5 МН/м² (4,2—5,0 кгс/см²), для пропана технического и смеси пропана и бутана технических <1,57 МН/м².

Жидкий остаток при +20°C должен отсутствовать у пропана технического и составлять <2,0% (объемн.) у бутана технического и смеси пропана и бутана технических.

ЖИДКИЕ ТОПЛИВА

Таблица VII-21

Характеристики нефтяного топлива (мазута) для транспортных и стационарных котельных установок и промышленных печей (по ГОСТ 10585—63 и 14298—69)

Наименование показателей	Мазут флотский		Мазут топочный			Топливо для мартеновских печей	
	Ф5	Ф12	40	100	200	малосернистое МП	сернистое МПС
Условная вязкость, °ВУ (градусы Энглера) при температуре, °С:							
50	<5,0	<12,0	—	—	—	—	—
80	—	—	<8,0	<15,5	—	<5,0—16,0	—
100	—	—	—	—	<6,9—9,5	—	—
Вязкость динамическая, η, при температуре, °С:							
10	17,0	—	—	—	—	—	—
0	27,0	—	—	—	—	—	—
Зольность, %	≤0,1	≤0,1	≤0,15	≤0,15	≤0,3	≤0,3	≤0,3
Содержание механических примесей, %	<0,1	<0,15	<1,0	<2,5	<2,5	<1,5	<1,5
Содержание воды, %	<1,0	<1,0	<2,0	<2,0	<1,0	<1,0	<1,0
Содержание водорастворимых кислот и щелочей				Отсутствуют			
Содержание серы, %	<2,0	<0,8		$\left\{ \begin{array}{l} <0,5^{*1} \\ <2,0^{*2} \\ <3,5^{*3} \end{array} \right.$		<0,5	<1,5

Наименования показателей	Мазут флотский		Мазут топочный			Топливо для мартеновских печей	
	Ф5	Ф12	40	100	200	малосернистое МП	сернистое МПС
Содержание сероводорода	Отсутствует						
Содержание смолистых веществ, %	<50	<50	—	—	—	—	—
Коксуемость, %	—	—	—	—	—	>8,0	>8,0
Температура вспышки, °С: при определении в закрытом тигле	>80	>90	—	—	—	—	—
при определении в открытом тигле	—	—	>90	>110	>140	>110	>110
Температура застывания, °С: при определении в пересчете сокопарфинированных нефтей, °С	<-5	<-8	<+10	<+25	<+36	<+25	<+25
Температура застывания топлива вы- сокопарфинированных нефтей, °С	—	—	<+25	<+42	<+42	—	—
Низшая теплота сгорания в пересчете на сухое топливо (небракочная), кДж/кг	{ 41430 — —	41430 — —	40720*1** 38480*2	40510*1** 38270*2	40300*1** 38060*2	40460 —	40190 —
Плотность при 20°С, г/см³	—	—	—	<1,015	—	<1,015	<1,015

Примечание. Для нефтяного топлива, подвергнутого водным перевозкам или слитого при подогреве острым паром, установлена норма показателя содержания воды: для топочного мазута 40 и 100 она равна < 5%, для флотского мазута Ф12 она составляет < 2%.

*1 Для малосернистого. *2 Для сернистого. ** Для высокосернистого.

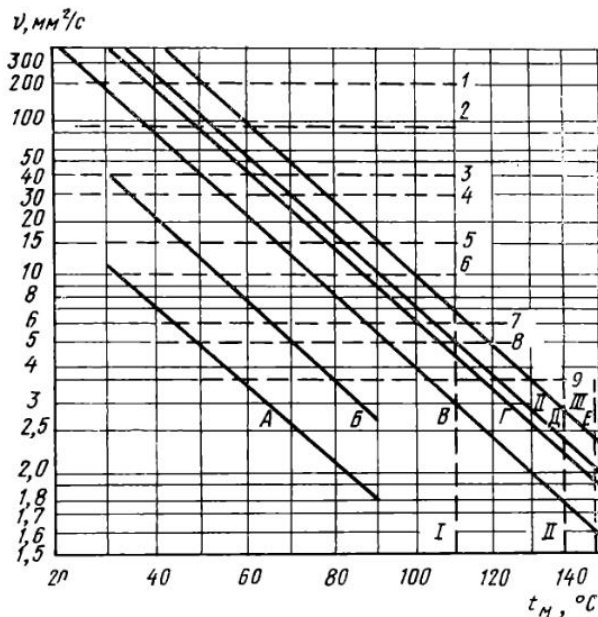


Рис. 55. Зависимость кинематической вязкости ν мазутов от их температуры t_M с указанием эксплуатационных пределов параметров:

1 — максимальная вязкость для винтовых и шестеренчатых насосов; 2 — то же, для поршневых насосов; 3 — средняя вязкость для подачи насосами и для слива; 4 — максимальная вязкость для центробежных насосов большой производительности; 5 — то же, для ротационных и паровых форсунок и в рециркуляционной системе; 6 — то же, для воздушных форсунок высокого и низкого давления; 7 — предельная вязкость для механических форсунок и рекомендуемая для паровых; 8 — рекомендуемая вязкость для воздушных форсунок; 9 — то же, для механических форсунок; I — максимальная температура мазута в подогревателе; II — то же, для пара; III — температура подогревателя, при которой начинается осаждение углерода (0,5 мм в месяц); А — мазут Ф5; Б — мазут Ф12; В — мазут 40; Г — мазут 100; Д — мазут МП; Е — мазут 200

Таблица VII-22

Соотношения между различными единицами вязкости

Условная вязкость, °ВУ (градусы Энглера)	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$, мм ² /с	Секунды по универсальному вискозиметру Сейболта	Секунды по вискозиметру Сейболта—Фуrolа	Секунды по вискозиметру Редвуда № 1	Секунды по вискозиметру Редвуда № 2
1,2	2,9	36	—	33	—
1,4	5,0	43	—	38	—
1,6	7,4	50	—	45	—
1,8	9,4	57	12	51	—
2,0	11,2	64	13	57	—
2,2	13,0	71	13	62	—
2,4	14,7	78	13	68	—
2,6	16,6	85	14	74	—
2,8	18,3	91	14	80	—
3,0	20,0	98	15	85	—
3,2	21,7	104	15	91	10
3,4	23,4	111	16	97	11
3,6	25,0	118	16	103	12
3,8	26,6	125	17	109	12
4,0	28,1	131	17	115	13
4,2	29,7	138	18	120	13
4,4	31,3	145	18	126	14
4,6	31,9	152	19	132	15
4,8	32,4	159	20	138	16
5,0	32,9	165	20	144	16
6,0	43,7	200	23	173	19
7,0	51,4	235	26	202	22
8,0	59,1	269	29	231	25
9,0	66,8	305	32	259	28
10,0	74,3	339	35	288	31
11,0	80,9	374	38	317	34
12,0	89,4	409	42	345	37
13,0	96,9	443	45	373	41
14,0	104,5	476	48	403	44
15,0	111,8	509	52	432	48

Условная вязкость, °ВУ (градусы Энглера)	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Секунды по универсальному вискозиметру Сейболта	Секунды по вискозиметру Сейболта-Фуrolа	Секунды по вискозиметру Редвуда № 1	Секунды по вискозиметру Редвуда № 2
20,0	150	675	70	570	62
25,0	187	850	86	720	78
30,0	224	1020	104	860	94
35,0	262	1190	120	1010	110
40,0	299	1360	137	1150	126
45,0	336	1530	153	1300	142
50,0	373	1700	170	1440	157
60,0	448	2050	205	1730	188
70,0	525	2375	238	2020	220
80,0	600	2720	272	2310	251
90,0	675	3065	307	2590	282
100,0	750	3410	341	2880	314

Таблица VII-23

Некоторые теплотехнические характеристики жидкого топлива

Топливо	Ψ^D , %	$Q_{H.}^D$, кДж/кг	$V_{c.r.}$, м ³ /кг	$i_{c.r.}$, м ³ /кг	$RO_{z \max}$, %
Бензин	0	43732	10,68	4103	14,8
Керосин	0	42915	10,49	4103	15,2
Дизельное автотракторное топливо . .	0	42622	10,44	4082	15,4
Соляровое масло . .	0	42329	10,36	4082	15,6
Моторное топливо .	1,5	41282	10,15	4061	15,6
Мазут малосернистый (марка):					
Ф5, Ф12	1	40863	10,20	4040	15,7
40	2	39775	10,0	4040	15,9
100, МП	3	39105	9,80	4019	16,2
200	4	38477	9,65	4019	16,4
Мазут сернистый (марка)					
40	1	39565	9,95	4061	15,9
100	2	38937	9,78	4061	16,0
200	3	38309	9,64	4040	16,2

Т а б л и ц а VII-24

Элементарный состав, теплота сгорания и расчетные характеристики смол
(средние данные)

Смола	Способ получения	Плотность при 20°С, т/м³	Вязкость условная ВУ ₅	Элементарный состав, %				Теплотехнические расчетные характеристики					
				горячая масса				теплота сгорания Q _н , кДж/кг	теоретическое количество воздуха L _{теор} , м³/кг	содержание RO ₂ , max, %	объем сухих продуктов сгорания V _{сух} , м³/кг	содержание водяных паров V _{H₂O} , м³/кг	жаропроизводительность t _ж , °С
				C ^г	H ^г	S ^г	N ^г + O ^г						
Каменноугольная	Коксование	1,04—1,2	24	90	7	1	2	35588	9,5	17,75	9,50	1,0	2040
Буроугольная	Газификация	1,1—1,2	55	83	7	2	8	33494	8,97	17,80	8,76	1,0	2060
Торфяная	Полукоксование	0,98—1,1	10	85	11	1	3	37263	9,97	16,20	9,80	1,45	2000
	Газификация	0,95—1,1	26	85	9	1	10	33494	8,97	17,10	8,73	1,20	2000
	Полукоксование	0,96	5	87	10,3	0,2	2	37681	10,05	16,50	9,80	1,38	2060
Сланцевая	Туннельная	0,96	1,6	84	10,5	0,5	5	36425	9,74	16,50	9,52	1,39	2000
	Газификация	1,00	4,7	83	10	1	6	35588	9,51	16,60	9,35	1,34	2000
Древесная	Сухая перегонка	1—1,2	20	72	8,75	—	19	30982	8,27	17,30	7,8	1,16	2080

* Балласт: W^P ≈ 5; A^P ≈ 1.

Таблица VII-25

Элементарный состав, теплота сгорания и расчетные характеристики смол и других жидких продуктов, могущих заменять мазут (данные ВНИИМТ)*1

Наименование жидких продуктов (смолы, масла и т. д.)	Исходное сырье	Плотность при 20°C, т/м ³	Вязкость условная			Температура, °C			Элементарный состав (средние данные), %						Теплота сгорания, кДж/кг	
			ВУ ₅₀	ВУ ₇₅	ВУ ₁₀₀	вспышка	воспламенение	застывания	горючая масса			балласт			Q _H ^r	Q _H ^p
									C ^r	H ^r	N ^r +O ^r	S ^r	ш ^p	A ^p		
Смола	Челябинский уголь	—	22,53	6,98	2,83	—	—	—	78,90	9,20	11,68	0,22	3,6	0,14	34960	33746
	Кизеловский уголь, сырье Губахинского коксохимического комбината	1,155	6,77	2,10	1,40	107	—	18	84,98	5,70	6,64	2,68	Следы	0,01	34893	34545
Пек	Кизеловский уголь Нижне-Тагильского коксохимического завода	—	—	—	—	—	—	—	86,69	4,84	7,04	1,43	То же	0,57	36174	36048
	вода	—	A	B	B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Нейтральное масло	Нижне-Тагильского торфохимического завода	0,917*2	1,68	1,22	1,08	67	89	21	85,73	10,83	3,06	0,38	0,9	0,4	40294	39201
	вода	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Парафиновое масло	Нижне-Тагильского торфохимического завода	0,971	1,67	1,38	1,28	75	93	7	81,35	9,61	8,74	0,30	0,10	0,10	36978	36789
	вода	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Смола	Нижне-Тагильского торфохимического завода	1,159	—	27,0*3	6,37	139	—	5	91,61	4,58	2,46	1,35	13,90	0,41	35219	29873
	вода	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*1. Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургической теплотехники. *2. При 15°C. *3. Не течет. A — ВУ₅₀, не течет. B — ВУ₇₅, не течет. B — ВУ₁₀₀, не течет. B — ВУ₁₀₀, не течет по каплям.

Коэффициент теплопроводности λ мазута топочного 40:

$t, ^\circ\text{C}$	30	40	50	60	70
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	0,135	0,135	0,133	0,131	0,130

Средняя теплоемкость при изменении температуры в интервале 20—100 $^\circ\text{C}$ составляет для мазутов 1,88—2,28 и для смол 2,09—2,43 кДж/(кг $\cdot^\circ\text{C}$).

Теплота плавления мазутов и смол равна соответственно 167—251 и 209—293 кДж/кг.

Таблица VII-26

Средние теплоемкости $c_{\text{ср}}$, кДж/(м $^3\cdot^\circ\text{C}$), и энтальпии i , кДж/м 3 , продуктов сгорания нефти, нефтяных масел и природного газа

Избыток воздуха, %	Температура, $^\circ\text{C}$				
	0	200	400	600	800
0	1,365; 0	1,398; 279,7	1,432; 572,8	1,465; 879,2	1,499; 1199,1
20	1,352; 0	1,382; 276,3	1,415; 566,1	1,444; 866,7	1,478; 1182,4
40	1,348; 0	1,377; 275,5	1,407; 562,7	1,436; 861,6	1,469; 1175,7
100	1,331; 0	1,357; 271,3	1,382; 552,7	1,407; 844,1	1,432; 1145,5

Продолжение табл. VII-6

Избыток воздуха, %	Температура, $^\circ\text{C}$			
	1000	1200	1400	1600
0	1,537; 1536,6	1,570; 1884,1	1,604; 2244,9	1,637; 2619,3
20	1,507; 1507,2	1,541; 1848,9	1,574; 2203,9	1,604; 2565,7
40	1,499; 1498,9	1,528; 1833,8	1,562; 2186,4	1,591; 2546,6
100	1,461; 1461,2	1,486; 1783,6	1,511; 2116,0	1,537; 2458,5

Продолжение табл. VII-6

Избыток воздуха, %	Температура, $^\circ\text{C}$			
	1800	2000	2200	2500
0	1,671; 3006,9	1,708; 3416,4	1,742; 3831,8	1,792; 4479,9
20	1,637; 2946,7	1,666; 3332,7	1,699; 3739,7	1,746; 4364,7
40	1,620; 2916,5	1,649; 3299,2	1,683; 3702,8	1,729; 4322,9
100	1,562; 2811,0	1,587; 3173,6	1,616; 3555,4	1,658; 4144,9

ТВЕРДЫЕ ТОПЛИВА

Качества ископаемых углей и горючих сланцев СССР

ГОСТом предусмотрена классификация углей отдельных бассейнов и месторождений по качеству (маркировка) и размерам кусков. В основу маркировки каменных углей положены две характеристики: выход летучих веществ на горючую массу V^r , $V^r_{\%}$ и толщина пластического слоя y или спекаемость.

Если толщина пластического слоя y менее 6 мм, то вводится характеристика нелетучего остатка; при выходе летучих веществ менее 9% (полуантрациты и антрациты) — теплота сгорания горючей массы (Q^r_6) в бомбе.

Ниже приведена также и старая маркировка по отдельным шахтам, которая может служить техническими условиями.

Бурые угли разделяют на группы по содержанию в них рабочей влаги W^p , %:

Группа Б1	>40
Группа Б2	30—40
Группа Б3	<30

Для углей за горючую массу условно принята разность $100 - W - A$, где 100 — рабочая или аналитическая масса топлива.

Для пересчета элементарного состава, выхода летучих веществ и теплоты сгорания в бомбе с одной массы топлива на другую рекомендуются множители, приведенные в табл. VII-27.

Т а б л и ц а VII-27

Множители для пересчета результатов анализа угля

Масса, с которой сделан пересчет	Множители для пересчета на массу			
	рабочую	аналитическую	сухую	горючую
Рабочая	1	$\frac{100 - W^a}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - A^p}$
Аналитическая	$\frac{100 - W^p}{100 - W^a}$	1	$\frac{100}{100 - W^a}$	$\frac{100}{100 - W^a - A^a}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	$\frac{100 - W^a}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Горючая	$\frac{100 - W^p - A^p}{100}$	$\frac{100 - W^a - A^a}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

Пересчет низшей теплоты сгорания с горючей массы на рабочую выполняют по формуле

$$Q_n^p = Q_n^r \frac{100 - W^p - A^p}{100} - 6 W^p.$$

Характеристика качества горючих сланцев приведена по теплоте сгорания сухой массы (Q_n^s), которая является для них расчетным показателем.

Ниже приведены классификация, маркировка и группировка углей Донецкого бассейна. Для углей других месторождений данные имеют близкие значения.

Средние данные о качестве углей приведены в табл. VII-28.

Т а б л и ц а VII-28

Классификация каменных углей антрацита Донецкого бассейна (по ГОСТ 8180—59)

Наименование марки	Условное обозначение		Показатели			Характеристика нелетучего остатка
	марки	группы	V^r , %	$V_{об}^r$, см ³ /г	y , мм	
Длиннопламенный	Д	—	37 и более	—	—	Порошкообразный, слипшийся, слабо-спекшийся
Газовый	Г	Г6	35 и более	—	6—15	—
		Г16	35 и более	—	16—25	
Жирный	Ж	Ж13	27—35	—	13—20	—
		Ж21	27—35	—	21 и более	
Коксовый	К	КЖ	18—27	—	21 и более	—
		К14	18—27	—	14—20	
Отощенный спекающийся	ОС	ОС6	14—22	—	6—13	Спекшийся, без порошка
		ОС	14—22	—	<6	
Тощий	Т	—	9—17	—	—	Порошкообразный, слипшийся, слабо-спекшийся
Полуантрацит	ПА	—	<9	220—330	—	—
Антрацит	А	—	<9	<220	—	—

Т а б л и ц а VII-29

Классификация углей и антрацита Донецкого бассейна по размерам кусков (по ГОСТ 8180—59)

Класс	Условное обозначение марок — классов			Размер кусков, мм
	Д	Г	А	
Плитный	—	—	АП	<100
Крупный	ДК	ГК	АК	50—100
Орех	ДО	ГО	АО	25—50

Класс	Условное обозначение марок—классов			Размер кусков, мм
	Д	Г	А	
Мелкий	ДМ	ГМ	АМ	13—25
Семечко	ДС	ГС	АС	6—13
Штыб	ДШ	ГШ	АШ	<6

Примечания: 1. При рассортировке сухого антрацита для класса АШ устанавливается размер кусков менее 3 мм взамен менее 6 мм и вводится дополнительный класс З (зубок) с размером кусков 3—6 мм.

2. Для углей марок Д и Г и антрацита при поставке их электростанциям и другим потребителям для сжигания в пылевидном состоянии, а также при повышенной их влажности устанавливается класс с размером кусков менее 13 мм, условно обозначаемый ДСШ, ГСШ и АСШ (семечко со штыбом), взамен классов 6—13 мм и менее 6 мм. При поставке для коксования угля марки Г выделяется класс размером кусков менее 25 мм, условно обозначаемый ГМСШ, взамен классов 13—25, 6—13 мм и менее 6 мм.

3. В тех случаях, когда производить рассортировку не представляется возможным (высокая влажность, незначительная механическая прочность) или экономически нецелесообразно, допускается выпуск марок Д, Г и антрацита также и в рядовом виде.

Группировка углей и антрацита Донецкого бассейна по зольности (по ГОСТ 863—70 и др.)

Группа	1	2	3	4
Зольность Ас, %	>8	>8—10	>10—12,5	>12,5—16,0
Группа	5	6	7	8
Зольность Ас, %	>16—20	>20—25	>25—31,5	>31,5—37,5

Группировка углей Донецкого бассейна для коксования по содержанию серы $S_{об}^c$ (по ГОСТ 8181—56)

Группа	1	2	3
$S_{об}^c$, %	<0,50	1,55—1,90	1,95—2,35
Группа	4	5	6
$S_{об}^c$, %	2,4—3,0	3,05—3,75	3,8—4,5

Маркировка углей Донецкого бассейна (действовавшая до утверждения ГОСТ 8180—59)

Марка и ее условное обозначение	V^r , %
Длиннопламенный (Д)	>42,0
Газовый (Г)	35,0—44,0
Паровичный жирный (ПЖ)	26,0—35,0
Коксовый (К)	18,0—26,0
Паровичный спекающийся (ПС)	12,0—18,0
Тощий (Т)	<17,0

Кокс

Основным потребителем кокса является черная металлургия (доменное производство). Для выплавки чугуна расходуется ~84% производимого в стране кокса. Литейное производство потребляет ~6%, цветной металлургией расходуется ~4% кокса. Для кокса, изготовляемого для различных видов потребления, имеются соответствующие ГОСТы. Нормы качества доменного кокса из углей Донецкого бассейна и углей восточных районов приведены на с. 184—185, нормы качества кокса литейного каменноугольного на с. 185.

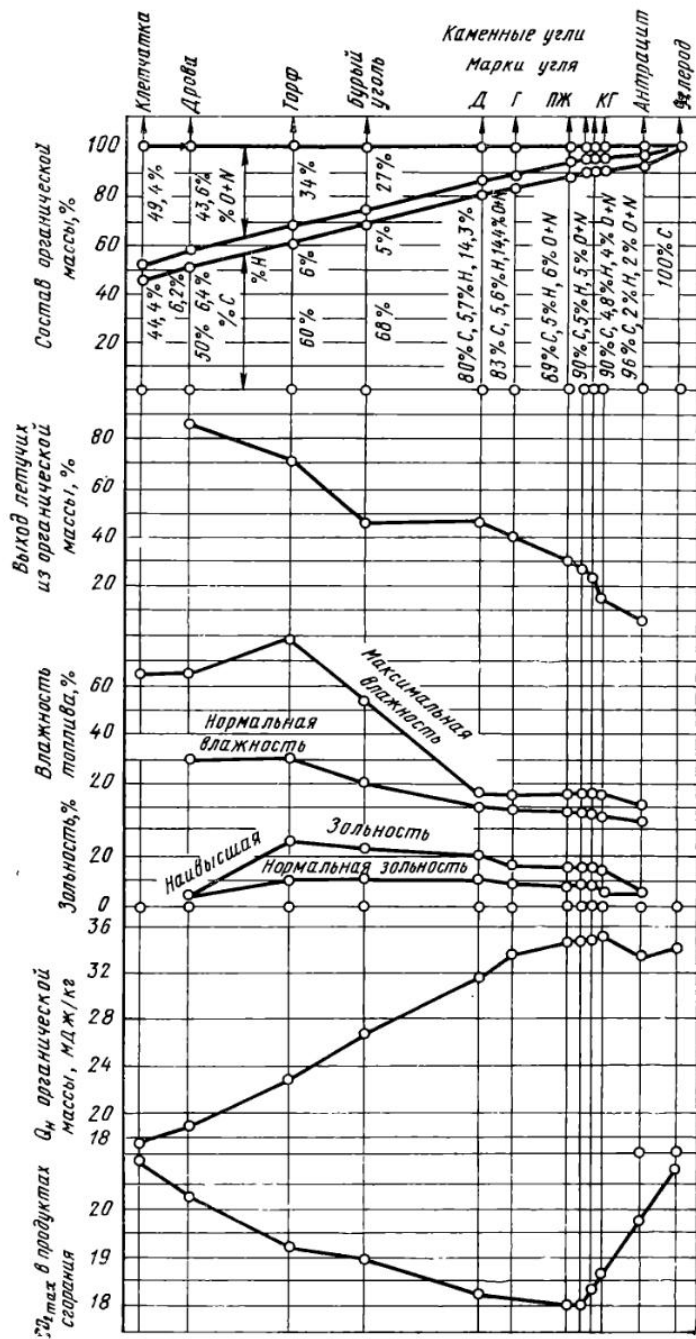


Рис. 56. Физико-химические характеристики твердого топлива

Таблица VII-30

Физико-химические характеристики углей Донецкого бассейна

Уголь	Марка	Содержание влаги, %		Состав сухой массы топлива, %						Состав горючей массы топлива, %					
		аналитической пробы	рабочей массы	A ^c	(CO ₂) _k ^c	S _{об} ^c	S _c ^c	S _k ^c	S _k ^r	S _{оп} ^r	C ^r	H ^r	N ^r	O ^r	V ^r
Длинноламенный	Д	4,5	13,0	16,0	—	4,5	0,2	2,4	2,9	2,3	76,5	5,5	1,6	11,2	43,0
Газовый	Г	3,0	7,0	17,0	—	3,7	0,1	2,1	2,5	1,8	80,5	5,4	1,5	8,3	39,9
Паровячий жирный	ПЖ	1,0	5,0	18,0	—	3,0	0,1	2,0	2,4	1,1	84,0	5,2	1,5	5,8	32,0
Коксовый	К	1,3	5,0	17,5	—	3,0	0,1	2,1	2,5	1,0	87,0	4,8	1,5	3,2	22,0
Паровячий спекающийся	ПС	0,8	5,0	19,0	—	2,9	0,1	1,6	2,0	1,0	88,5	4,5	1,5	2,5	16,0
Тощий	Т	1,0	5,0	17,0	0,8	2,5	0,1	1,9	2,3	1,1	89,5	4,2	1,5	1,4	13,0
Антрацит	А	2,0	5,8	14,0	0,5	2,0	0,1	1,2	1,4	0,8	93,5	2,0	0,8	1,5	3,5
Промпродукт обогатительных фабрик	ПЖ	1,8	11,0	40,0	0,2	3,5	0,2	2,7	4,5	1,0	77,5	5,5	1,5	10,0	43,0
	К	1,0	9,0	40,0	0,2	4,3	0,2	3,5	5,8	1,0	80,0	5,4	1,7	6,1	34,0
	Т	1,0	9,0	40,0	0,2	3,3	0,2	2,5	4,2	1,0	83,5	5,1	1,7	4,5	25,0
		1,4	8,0	40,0	0,2	3,5	0,2	2,5	4,1	1,4	84,5	4,5	1,5	4,0	19,0

Продолжение табл. VII-30

Уголь	Марка	Нелетучий остаток	Теплота сгорания, кДж/кг			Лабораторный относительный коэффициент размолистости K _{л.о}	Температура плавления золы, °C			
			Q _б ^r	Q _н ^r	Q _н ^p		начала деформации t ₁	начала размягчения t ₂	начала жидкотекучести t ₃	
										32657
Длинноламенный	Д	Порошкообразный или слабоспекшийся	32657	30899	22274	1,10	1050	1150	1200	
Газовый	Г	Спекшийся	33913	32238	24702	1,15	1050	1150	1220	
Паровячий жирный	ПЖ	»	35378	33829	26209	1,50	1100	1120	1200	
Коксовый	К	»	35797	34332	26796	1,90	1080	1120	1190	
Паровячий спекающийся	П	»	36006	34667	26544	1,90	1060	1230	1260	
Тощий	Т	Порошкообразный или слабоспекшийся	36006	34667	27214	1,80	—	—	—	
Антрацит	А	Порошкообразный	34206	33369	27005	1,2	980—1020	1050—1120	1090—1150	
Промпродукт обогатительных фабрик	ПЖ	Порошкообразный	33285	31443	16496	1,5	1080—1140	1200—1350	1350—1400	
	К	Слабоспекшийся и порошкообразный	34332	32406	17459	1,5	1010—1160	1180—1390	1200—1420	
	Т	Спекшийся	34750	33034	17794	1,5	1100	1350	1370	
		Порошкообразный	34332	32741	17878	1,6	—	—	—	

Элементарный состав кокса, получаемого из углей различных месторождений и угольных шахт, практически одинаков. Вследствие этого теплота сгорания органической массы кокса относительно устойчива и составляет ~33500 кДж/кг. Влажность кокса колеблется в пределах 2—3% и зольность 9—10%. Эти параметры являются определяющими для теплоты сгорания товарного кокса, которая в среднем равна 29300 кДж/кг.

Средняя теплоемкость кокса уменьшается с увеличением зольности кокса и возрастает с повышением конечной температуры коксования (см. табл. VII-34).

Коэффициент теплопроводности кокса выше, чем углей. При 20°C теплопроводность монолитного куска кокса $\lambda=0,465-0,815$ Вт/(м·°C).

С повышением температуры теплопроводность кокса возрастает, и в области температур конца коксования приближается к 1,75—2,0 Вт/(м·°C).

Таблица VII-31

Нормы качества доменного кокса из углей Донецкого бассейна* (ГОСТ 513—63)

Показатели	Марки кокса					
	КД-I		КД-II		КД-III	
	Класс крупности, мм					
	<40	<25	<40	<25	<40	<25
Содержание влаги W^p , %:						
среднее	—	—	3,0	—	—	—
предельное	—	—	5,0	—	—	—
Зольность A^c , %:						
I группа:						
средняя	—	—	9,3	—	—	—
предельная	—	—	10,0	—	—	—
II группа:						
средняя	—	—	9,6	—	—	—
предельная	—	—	10,6	—	—	—
Содержание серы $S_{об}^c$, %:						
среднее	1,70	—	1,80	1,90	1,90	1,90
предельное	1,79	—	1,89	1,99	1,99	1,99
Содержание фосфора P^c , %	≤0,015	—	—	—	—	—
Выход летучих V^r , %	1,2	—	1,2	1,2	1,2	1,2
Механическая прочность						
M40, %:						
I группа:						
средняя	—	—	82	—	—	—
предельная	—	—	80	—	—	—
II группа:						
средняя	—	—	77	—	—	—
предельная	—	—	75	—	—	—
III группа:						
средняя	—	—	72	—	—	—
предельная	—	—	70	—	—	—
Механическая прочность						
M10, %:						
I группа	—	—	8,0	—	—	—
II группа	—	—	9,0	—	—	—
III группа	—	—	10,0	—	—	—
Предельное содержание в коксе мелочи (куски размером <25 мм), %	3,0	4,0	3,0	4,0	3,0	4,0
Содержание кокса класса 25—40 мм в коксе, % предельное	9,0	16,0	9,0	16,0	9,0	16,0

* Нормы содержания фосфора, выхода летучих веществ, механической прочности M10 и содержания кокса класса 25—40 мм в коксе с размером кусков более 25 мм не являются браковочными и служат для характеристики качества кокса.

Таблица VII-32

Нормы качества доменного кокса из углей восточных районов (ГОСТ 2014—53*)

Показатели	Марки кокса							
	КД-I		КД-II		КД-III		КД-IV	
	Класс крупности, мм							
	<40	25—40	<40	25—40	<40	25—40	<40	25—40
Содержание влаги W^p , %:								
среднее	3,0	8,0	3,0	8,0	3,0	8,0	3,0	8,0
предельное	5,0	12,0	5,0	12,0	5,0	12,0	5,0	12,0
Зольность A^c , %:								
средняя	10,5	10,6	10,6	10,6	11,6	11,7	10,5	10,8
предельная	11,5	11,6	11,6	11,6	12,6	12,7	11,7	12,0
Содержание серы $S_{об}^c$, %	0,5	—	0,5	—	0,7	—	0,5	—
Выход летучих V^r , %	1,5	—	1,5	—	1,5	—	1,5	—
Механическая прочность М40, %:								
I группа:								
средняя	77	—	77	—	77	—	77	—
предельная	73	—	73	—	73	—	73	—
II группа:								
средняя	71	—	71	—	71	—	71	—
предельная	68	—	68	—	68	—	68	—
III группа:								
средняя	66	—	66	—	66	—	66	—
предельная	62	—	62	—	62	—	62	—
Механическая прочность М10, %:								
I группа	9	—	9	—	9	—	9	—
II группа	10	—	10	—	10	—	10	—
III группа	12	—	12	—	12	—	12	—
Содержание мелочи в коксе (куски менее 25 мм), %:								
среднее	1,5	6,0	—	—	1,5	6,0	3,0	6,0
предельное	3,0	8,0	—	—	3,0	8,0	5,0	8,0
Содержание кокса класса 25—40 мм в коксе класса крупности 40 мм и более, %, предельное	9	—	10	—	10	—	10	—

Примечания: 1. ГОСТ 2014—53* не распространяется на кокс из углей Кизеловского, Печорского, Карагандинского и Кузнецкого бассейнов, на которые распространяются ГОСТ 3132—63, 8836—58*, 10166—62 и 9813—91.

2. Показатели содержания в коксе серы, выхода летучих веществ, механической прочности (М10) не являются браковочными и служат для характеристики качества кокса.

Таблица VII-33

Нормы качества кокса литейного каменноугольного (ГОСТ 3340—60)

Показатели	Марки кокса		
	КЛ-1	КЛ-2	КЛ-3
Класс крупности, мм:			
I группа	—	>80	—
II группа	>60	60—80	—
III группа	>40	40—60	—
Предельное содержание влаги, %:	—	4,0	—
Зольность A^c , %:			
средняя	11,0	9,5	10,5
предельная	12,5	11,0	12,0
Содержание серы $S_{об}^c$, %:			
среднее	0,45	0,8	1,2
предельное	0,6	1,0	1,4

Показатели	Марки кокса		
	КЛ-1	КЛ-2	КЛ-3
Выход летучих V_r , %	—	1,2	—
Механическая прочность М40, %:			
I группа:			
средняя	—	80	—
предельная	—	75	—
II группа:			
средняя	—	73	—
предельная	—	68	—
Механическая прочность М10, %:			
I группа	—	10	—
II группа	—	12	—
Содержание мелочи (<40 мм) в крупном коксе, %	—	≤4,0	—
Пористость, %	—	≤42	—

Примечание. Показатели содержания W^P , V^r , механической прочности М10 и пористости кокса не являются браковочными признаками и служат дополнительной характеристикой кокса.

Таблица VII-34

Средняя теплоемкость кокса, кДж/(кг·°С)

Температурные интервалы коксования, °С	Зольность A^C кокса, %				
	7	9	11	13	15
0—800	1,4110	1,4026	1,3984	1,3900	1,3816
0—850	1,4361	1,4277	1,4193	1,4110	1,4068
0—900	1,4570	1,4486	1,4403	1,4319	1,4235
0—950	1,4779	1,4696	1,4612	1,4528	1,4444
0—1000	1,4447	1,4863	1,4738	1,4654	1,4570
0—1050	1,5114	1,4989	1,4905	1,4821	1,4738
0—1100	1,5282	1,5198	1,5114	1,5031	1,4947

СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА

ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

А. По Кнорре

Древесное топливо

$$Q_v = 38728 C + 115974 H - 14486 O \text{ кДж/кг.}$$

Торф и мазут

$$Q_v = 37179 C + 111536 H - 13942 O \text{ кДж/кг.}$$

Бурый уголь

$$Q_v = 36425 C + 109275 H - 13649 O \text{ кДж/кг.}$$

Битуминозные каменные угли

$$Q_v = 35797 C + 107182 H - 13398 O \text{ кДж/кг.}$$

Антрациты

$$Q_v = 35169 C + 105089 H - 13188 O \text{ кДж/кг.}$$

Б. По Менделееву

$$Q_v = 339 C + 1256 H + 109 (S - O) \text{ кДж/кг.}$$

Для всех формул

$$Q_n = Q_v - 25 (9H + W) \text{ кДж/кг,}$$

где W — влажность топлива, %.

Общая формула для определения теплоты сгорания газообразного топлива

$$Q_n^{об} = \frac{q_{CO} CO + q_{H_2} H_2 + q_{CH_4} CH_4 + \dots}{100}$$

где q_{CO} , q_{H_2} — теплота реакции сгорания горючих газов, кДж/м³ (см. табл. VII-1; VIII-3 и VIII-4);CO, H₂ — содержание горючих газов, %.

Таблица VIII-1

Формулы для приближенных расчетов по сжиганию топлива

Вид топлива	Теоретически необходимое количество сухого воздуха, м ³ /кг	Вид топлива	Разность между объемом продуктов сгорания и количеством израсходованного воздуха, м ³ /кг
Растительные суррогаты, дрова и торф	$L_{теор} = \frac{0,255}{1000} Q_n^p + 0,007 W^p - 0,06$	Растительные суррогаты, дрова, торф и каменные угли с $A^p < 16\%$	$\Delta V = 1,15 - \frac{0,028}{1000} Q_n^p$
		Бурые угли с $A^p < 16\%$	$\Delta V = 1,02 - \frac{0,026}{1000} Q_n^p$

Вид топлива	Теоретически необходимое количество сухого воздуха, м ³ /кг	Вид топлива	Разность между объемом продуктов сгорания и количеством израсходованного воздуха, м ³ /кг
		Бурые и каменные угли с $A^e = 16 - 30\%$	$\Delta V = 0,97 - \frac{0,026}{1000} Q_H^p$
Бурые и каменные угли, антрацит и жидкое топливо с $Q_H^p < 29308$ кДж/кг	$L_{теор} = \frac{0,263}{1000} Q_H^p + 0,007 W^p - \Delta L$, где для антрацита и кокса $\Delta L = 0$, а для прочих топлив $\Delta L = +0,06$	Угли с $A^e > 30\%$, антрацит и кокс	$\Delta V = 0,4 - \frac{0,086}{1000} \times Q_H^p + 0,0124 (W^p - W_{гр})$ для бурых углей $W_{гр} = 8\%$; для каменных углей $W_{гр} = 0\%$; для кокса $W_{гр} = 12\%$; для прочих $W_{гр} = W^p$
		Жидкое топливо с $Q_H^p > 29308$ кДж/кг	$\Delta V = \frac{0,028}{1000} Q_H^p - 0,48 + 0,0124 (W^p - W_{гр})$; для мазута $W_{гр} = 2\%$; для прочих $W_{гр} = W^p$
Доменный газ	$L_{теор} = \frac{0,191}{1000} Q_H$	Доменный газ	$\Delta V = 0,97 - \frac{0,031}{1000} Q_H$
Генераторный паровоздушный и водяной) и доменный древесноугольный газы	$L_{теор} = \frac{0,203}{1000} Q_H + \Delta L$; для газа с $Q_H > 5652$ кДж/м ³ $\Delta L = +0,03$; для газа с $Q_H = 5234 \div 5652$ кДж/м ³ $\Delta L = 0$; для газа с $Q_H < 5234$ кДж/м ³ $\Delta L = -0,01$	Генераторный, паровоздушный и доменный древесноугольный газы	$\Delta V = 0,98 - \frac{0,031}{1000} Q_H$
		Генераторный водяной газ	$\Delta V = 1,01 - \frac{0,043}{1000} Q_H$
Коксовый газ	$L_{теор} = \frac{0,257}{1000} Q_H - 0,25$	Коксовый газ	$\Delta V = 0,68 + a \times \frac{Q_H - 16747}{1000}$ при $Q_H > 16747$ кДж/м ³ $a = +0,014$; при $Q_H < 16747$ кДж/м ³ $a = -0,024$
Природный газ	$L_{теор} = \frac{0,264}{1000} Q_H + \Delta L$; при $Q_H < 41868$ кДж/м ³ $\Delta L = 0,02$; при $Q_H > 41868$ кДж/м ³ $\Delta L = 0$	Природный газ	при $Q_H < 34541$ кДж/м ³ $\Delta V = 1,0$; при $Q_H > 34541$ кДж/м ³ $\Delta V = 0,38 + \frac{0,179}{1000} Q_H$

ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВ

Таблица VIII-2

Температура воспламенения и пределы горючести газов

Газ и его химическая формула	Температура воспламенения в смеси с воздухом, °С	Максимальная скорость распространения пламени, см/с	Содержание газа в смеси, %		Соотношение воздух/газ		Коэффициент расхода воздуха		Теоретическое количество воздуха, м³/м³
			при максимальной скорости распространения пламени	предел горючести	при максимальной скорости распространения пламени	предел горючести	при максимальной скорости распространения пламени	предел горючести	
			верхний	нижний	верхний	нижний	верхний	нижний	
Метан (CH ₄)	537	67,0	15,0	5,0	8,5	5,65	0,59	2,00	9,52
Этан (C ₂ H ₆)	510	85,0	12,5	3,2	14,3	7,00	0,42	1,82	16,67
Этилен (C ₂ H ₄)	540	142,0	18,6	2,75	13,3	2,50	0,75	2,48	14,29
Пропан (C ₃ H ₈)	466	82,0	9,5	2,37	20,2	9,50	0,40	1,70	23,81
Нормальный бутан (C ₄ H ₁₀)	430	82,5	8,4	1,86	26,3	10,90	0,35	1,66	30,95
Пропилен (C ₃ H ₆)	455	101,0	11,1	2,0	19,8	8,00	0,37	2,28	21,43
Оксид углерода (CO)	610	33,0	74,2	12,5	0,89	0,34	0,14	3,0	2,38
Водород (H ₂)	510	483,0	74,2	4,0	1,38	0,34	0,14	10,0	2,38
Ацетилен (C ₂ H ₂)	335	131,0	80,0	2,5	9,0	0,24	0,20	3,28	11,90
Бензол (C ₆ H ₆)	570	38,5	6,75	1,41	32,2	13,8	0,39	1,96	35,70
Аммиак (NH ₃)	780	—	26,40	16,10	—	2,78	0,78	1,47	3,57
Генераторный газ	530	—	74,0	20,7	—	0,35	0,29	3,2	1,19
Коксовый газ	500	170,0	30,4	5,6	—	2,32	0,57	4,15	4,06
Природный газ	530	—	72,0	3,0	—	5,65	0,63	1,90	9,25
Водяной газ	—	280,0	—	6,2	—	—	—	—	—
Доменный газ	530	—	74,0	35,0	—	—	—	—	—

Примечания: I. С повышением температуры пределы воспламенения расширяются. Пределы воспламенения газовых смесей, состоящих из однородных горючих компонентов с малым содержанием балласта (например, природных газов), определяются из соотношения $L = \frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3} + \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3} + \frac{n_4}{n_4}$, где L — предел воспла-

нения (нижний или верхний) газовой смеси, состоящей из компонентов 1, 2, 3,; содержание компонентов в газовой смеси P₁, P₂; пределы воспламенения (нижний или верхний) компонентов n₁, n₂, Пределы воспламенения сужаются, если в газовой смеси содержатся CO и H₂O. 2. Данные определены при зажигании в трубке с d₀=25 мм. При изменении диаметра трубки скорость воспламенения также изменяется, при d₀=100 мм она увеличивается в 1,6 раза; при d₀=200 мм — в 2,2 раза; при d₀=300 мм — в 2,6 раза.

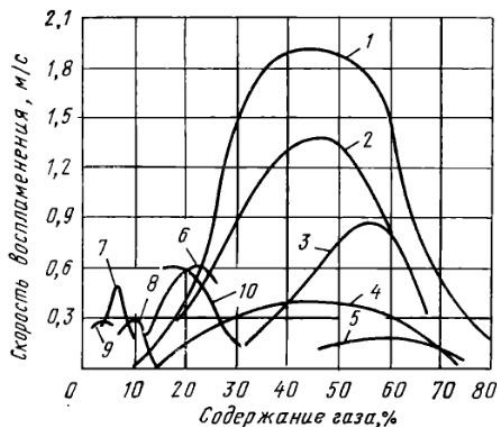


Рис. 57. Зависимость скорости воспламенения газо-воздушных смесей от содержания газа:
 1 — водород; 2 — водяной газ; 3 — смесь генераторного и водяного газов; 4 — окись углерода; 5 — генераторный газ; 6 — светильный газ; 7 — этилен; 8 — метан; 9 — бутан; 10 — коксовый газ ($Q_p = 19750$ кДж/м³)

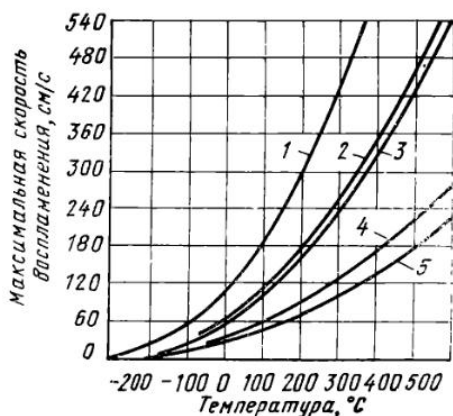


Рис. 58. Зависимость скорости воспламенения газо-воздушных смесей в зависимости от температуры t_p подогрева:
 1 — водяной газ; 2 — коксовый газ; 3 — карбюрированный водяной газ; 4 — природный газ; 5 — генераторный газ

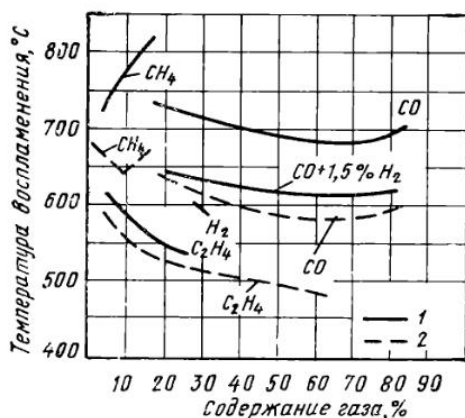


Рис. 59. Зависимость температуры воспламенения от содержания газов:
 1 — в смеси с воздухом; 2 — в смеси с кислородом

Таблица VIII-3

Тепловые эффекты реакций горения

Уравнения реакций	Тепловой эффект реакций						
	H ₂ O (жидкость)	H ₂ O (пар)					
		кДж/моль	кДж/моль	кДж/м ³	кДж/кг	кДж/моль	кДж/кг
	окисляемого вещества				кислорода		
H ₂ + 0,5 O ₂ = H ₂ O	285791	241746	10785	119910	484078	15127	
2 H ₂ + C = CH ₄	—	79666	—	—	—	—	
2 H ₂ + 2C = C ₂ H ₄	—	59218	—	—	—	—	
C (графит) + O ₂ = CO ₂	—	394480	—	—	—	—	
C (аморфный) + O ₂ = CO ₂	—	408841	—	34068	408841	12774	
C (графит) + 0,5 O ₂ = CO	—	110389	—	—	—	—	
C (аморфный) + 0,5 O ₂ = CO	—	125478	—	10270	246435	7700	
C + CO ₂ = 2 CO	—	-162406	—	-13548	—	—	
C + H ₂ O _{пар} = CO ₂ + H ₂	—	-118821	—	-9902	—	—	
CO + 0,5 O ₂ = CO ₂	—	282986	12627	10102	571247	17853	
CO + H ₂ O _{пар} = CO ₂ + H ₂	—	43585	—	—	—	—	
S + O ₂ = SO ₂	—	296927	—	9131	584477	18263	
H ₂ S + 1,5 O ₂ = SO ₂ + H ₂ O	563166	518996	23170	15265	349573	10794	

Тепловые эффекты реакций горения углеводородов

Наименование	Уравнения реакций	H ₂ O (пар)			H ₂ O (жидкость)	
		кДж/м ³	кДж/моль	кДж/кг	кДж/моль	кДж/моль
Метан	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	35818	803112	50062	891202	
Этан	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	63748	1429290	47533	1561425	
n-Пропан	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 = 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$	91255	2046047	46402	2222186	
n-Бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5 \text{O}_2 = 4 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$	118646	2660083	45770	2880309	
n-Пентан	$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8 \text{O}_2 = 5 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	146077	—	—	—	
Бензол	$\text{C}_6\text{H}_6 + 7,5 \text{O}_2 = 6 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	140375	3147008	40294	3279144	
Метилбензол	$\text{C}_7\text{H}_8 + 9 \text{O}_2 = 7 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$	168393	—	—	—	
Этилбензол	$\text{C}_8\text{H}_{10} + 10,5 \text{O}_2 = 8 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$	193850	—	—	—	
Пропилбензол	$\text{C}_9\text{H}_{12} + 12 \text{O}_2 = 9 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	223232	—	—	—	
Этилен	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	59063	1324096	47202	1412166	
Пропилен	$\text{C}_3\text{H}_6 + 4,5 \text{O}_2 = 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	86001	—	—	—	
Бутилен	$\text{C}_4\text{H}_8 + 6 \text{O}_2 = 4 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$	113508	2544695	45356	2720876	
Пентилен	$\text{C}_5\text{H}_{10} + 7,5 \text{O}_2 = 5 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$	140885	—	—	—	
Ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	56053	1256207	48249	1300253	
Метилацетилен	$\text{C}_3\text{H}_4 + 4 \text{O}_2 = 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	100140	—	—	—	
Этилацетилен	$\text{C}_4\text{H}_6 + 5,5 \text{O}_2 = 4 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	110075	—	—	—	
Пентин	$\text{C}_5\text{H}_8 + 7 \text{O}_2 = 5 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$	137390	—	—	—	
Циклопентан	$\text{C}_5\text{H}_{10} + 7,5 \text{O}_2 = 5 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$	138374	—	—	—	
Метилциклопентан	$\text{C}_6\text{H}_{12} + 9 \text{O}_2 = 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	165420	—	—	—	
Этилциклопентан	$\text{C}_7\text{H}_{14} + 10,5 \text{O}_2 = 7 \text{CO}_2 + 7 \text{H}_2\text{O}$	192873	—	—	—	
Пролилциклопентан	$\text{C}_8\text{H}_{16} + 12 \text{O}_2 = 8 \text{CO}_2 + 8 \text{H}_2\text{O}$	220301	—	—	—	
Циклогексан	$\text{C}_6\text{H}_{12} + 9 \text{O}_2 = 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	164688	—	—	—	
Метилциклогексан	$\text{C}_7\text{H}_{14} + 10,5 \text{O}_2 = 7 \text{CO}_2 + 7 \text{H}_2\text{O}$	191638	—	—	—	
Этилциклогексан	$\text{C}_8\text{H}_{16} + 12 \text{O}_2 = 8 \text{CO}_2 + 8 \text{H}_2\text{O}$	219242	—	—	—	
Пропилциклогексан	$\text{C}_9\text{H}_{18} + 13,5 \text{O}_2 = 9 \text{CO}_2 + 9 \text{H}_2\text{O}$	246644	—	—	—	

Таблица VIII-5

Жаропроизводительность, °С, некоторых топлив (для ориентировочных подсчетов)

Топливо	Избыток воздуха, %, при температуре,		
	0	50	100
Окись углерода	2400	1850	1500
Углерод	2240	1640	1300
Водород	2200	1680	1300
Природный газ ($Q_H^P = 35567$ кДж/м ³)	2050	1550	1170
Нефть ($Q_H^P = 42031$ кДж/м ³)	2150	1590	1220
Древесина безводная ($Q_H^P = 17585$ кДж/м ³)	2050	1520	1170
Древесина при влажности:			
20% ($Q_H^P = 14235$ кДж/м ³)	1850	1420	1110
40% ($Q_H^P = 10048$ кДж/м ³)	1670	1290	1080
50% ($Q_H^P = 7954$ кДж/м ³)	1510	1200	1000
Торфяная масса безводная ($Q_H^P = 22337$ кДж/м ³)	2050	1530	1190
Торф при влажности:			
20% ($Q_H^P = 17333$ кДж/м ³)	1920	1440	1160
40% ($Q_H^P = 12393$ кДж/м ³)	1710	1320	1090
50% ($Q_H^P = 9910$ кДж/м ³)	1570	1210	1010
Буроугольная масса безводная ($Q_H^P = 27604$ кДж/м ³)	2060	1540	1210
Бурый уголь при влажности:			
20% ($Q_H^P = 21604$ кДж/м ³)	2030	1500	1190
40% ($Q_H^P = 15575$ кДж/м ³)	1800	1400	1120
Каменный уголь:			
безводный ($Q_H^P = 32196$ кДж/м ³)	2180	1555	1220
при влажности 5% ($Q_H^P = 30857$ кДж/м ³)	2170	1545	1210
Антрацит:			
безводный, на горючую массу ($Q_H^P = 35253$ кДж/м ³)	2270	1565	1220
при влажности 5% ($Q_H^P = 33076$ кДж/м ³)	2260	1555	1210

Топливо	Избыток воздуха, %, при температуре,			
	0	20	40	100
Доменный газ при $Q_H^{Д.Г}$, кДж/м ³ :				
3869	1450	1340	1260	1050
3977	—	—	—	—
4032	1500	1400	1300	1070
4187	1530	1430	1330	1100
Генераторный газ ($Q_H^{Г.Г} = 5422$ кДж/м ³)	1780	1610	1400	1190
Воздушно-генераторный газ. ($Q_H^{В.Г} = 4430$ кДж/м ³)	1600	1500	1380	1150
Генераторный газ из бурого угля ($Q_H^{Г.Б} = 6163$ кДж/м ³)	1800	1620	1500	1200
Колошниковый газ торфяной домны:				
на обыкновенном дутье ($Q_H^K = 6435$ кДж/м ³)	1830	1640	1520	1210
на кислородном дутье ($Q_H^{К.К} = 11062$ кДж/м ³)	2110	1860	1630	1300
Коксовый газ ($Q_H^{К.Г} = 16027$ кДж/м ³)	2100	1800	1550	1230
Водяной газ ($Q_H^{В.Г} = 10819$ кДж/м ³)	2220	2000	1800	1360

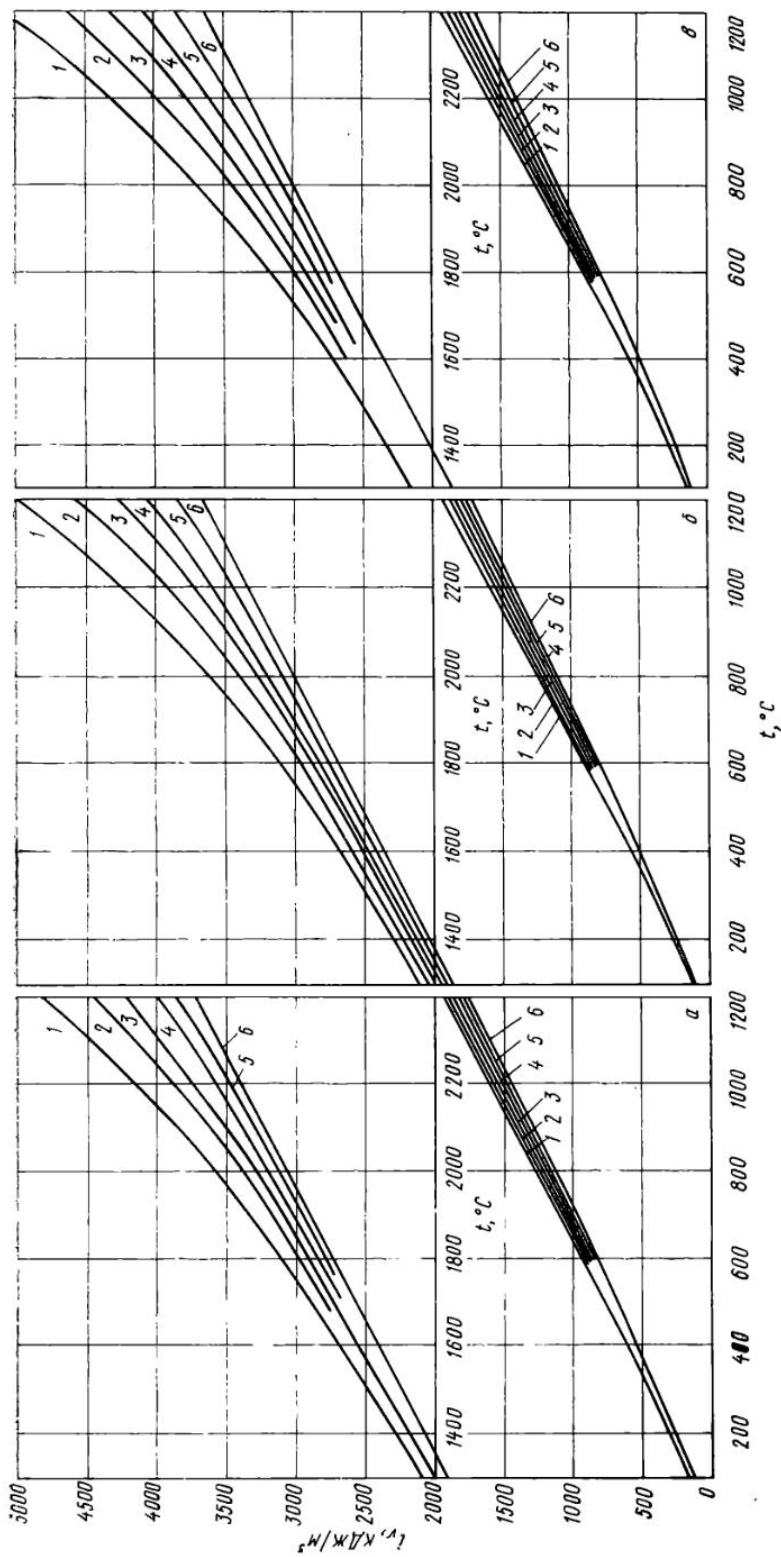


Рис. 60. Диаграмма $i-t$:
 а — для газов: природного, коксового и смеси коксового и доменного при $QR_H > 12$ МДж/м³; б — для газов: паровоздушного генераторного, смеси доменного и коксового при $QR_H = 8 \div 12$ МДж/м³, мазута, каменного угля, антрацита, кокса; в — для газов: водяного, генераторного, смеси доменного и коксового при $QR_H < 8$ МДж/м³, бурых углей, горючих сланцев, торфа и дров; 1 — $V_L = 0\%$ (продукты сгорания без воздуха); 2 — $V_L = 20\%$; 3 — $V_L = 40\%$; 4 — $V_L = 60\%$; 5 — $V_L = 80\%$; 6 — чистый воздух

КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА И ДЫМА

Таблица VIII-6

Теоретический расход воздуха L_{1000} и объем дыма V_{1000} на 1000 кДж [$L_{4,2}$ и $V_{4,2}$ на 4,2 МДж (1000 ккал)] при сжигании различных топлив

Название топлива	L_{1000} , м ³ /1000 кДж (м ³ /4,2 МДж)	V_{1000} , м ³ /1000 кДж (м ³ /4,2 МДж)
Кокс, влажность <5%	0,263 (1,10)	0,265 (1,11)
Антрацит	0,263 (1,10)	0,270 (1,13)
Каменный уголь	0,260 (1,09)	0,270 (1,13)
Бурый уголь, влажность, %:		
20	0,265 (1,11)	0,296 (1,24)
40	0,274 (1,15)	0,327 (1,37)
Торф, влажность, %:		
20	0,265 (1,11)	0,305 (1,28)
30	0,270 (1,13)	0,327 (1,37)
40	0,274 (1,15)	0,348 (1,46)
50	0,289 (1,21)	0,382 (1,60)
Дрова, влажность, %:		
20	0,263 (1,10)	0,317 (1,33)
30	0,272 (1,14)	0,344 (1,44)
40	0,277 (1,16)	0,368 (1,54)
50	0,294 (1,23)	0,413 (1,73)
Мазут сухой	0,260 (1,09)	0,279 (1,17)
Мазут влажностью 3%	0,265 (1,11)	0,286 (1,20)
Природный газ	0,265 (1,11)	0,296 (1,24)
Коксовый газ ($Q_{H^{K.G}} = 15910$ кДж/м ³)	0,244 (1,02)	0,289 (1,21)
Водяной газ ($Q_{H^{B.G}} = 10802$ кДж/м ³)	0,208 (0,87)	0,263 (1,10)
Двойной водяной газ	0,217 (0,91)	0,284 (1,19)
Генераторный газ очищенный:		
воздушно-генераторный ($Q_{H^{B.F}} = 4430$ кДж/м ³)	0,191 (0,80)	0,382 (1,60)
генераторный ($Q_{H^G} = 5422$ кДж/м ³)	0,200 (0,84)	0,346 (1,45)
генераторный буроугольный ($Q_{H^{G.B}} = 6163$ кДж/м ³)	0,210 (0,88)	0,339 (1,42)
Генераторный газ неочищенный	0,210 (0,88)	0,339 (1,42)
То же, генератор непосредственно примыкает к печи:		
из каменного угля ($Q_{H^G} = 5234$ кДж/м ³)	0,203 (0,85)	0,353 (1,40)
из бурого угля, торфа или древесины ($Q_{H^G} = 6280$ кДж/м ³)	0,212 (0,89)	0,382—0,394 (1,60—1,65)
Доменный газ очищенный при 30°C $Q_{H^{D.G}}$, кДж/м ³ :		
3349	0,191 (0,80)	0,458 (1,92)
3768	0,193 (0,81)	0,418 (1,75)
4187	0,196 (0,82)	0,411 (1,72)
4605	0,198 (0,83)	0,406 (1,70)
Смесь доменного и коксового газов при температуре сгорания доменного газа ($Q_{H^{D.G}} = 3977$ кДж/м ³), коксового газа ($Q_{H^{K.G}} = 15910$ кДж/м ³) и при следующих соотношениях компонентов:		
доменного газа 75%, коксового газа 25%; $Q_{H^{CM}} = 6954$ кДж/м ³	0,222 (0,93)	0,341 (1,43)
доменного газа 70%, коксового газа 30%; $Q_{H^{CM}} = 7557$ кДж/м ³	0,227 (0,95)	0,334 (1,40)
доменного газа 60%, коксового газа 40%; $Q_{H^{CM}} = 8750$ кДж/м ³	0,232 (0,97)	0,322 (1,35)
доменного газа 50%, коксового газа 50%; $Q_{H^{CM}} = 9944$ кДж/м ³	0,234 (0,98)	0,313 (1,31)
доменного газа 40%, коксового газа 60%; $Q_{H^{CM}} = 11137$ кДж/м ³	0,236 (0,99)	0,305 (1,28)

Рис. 61. Зависимость изменения плотности ρ газа от его температуры t и состава (заштрихована наиболее уплотнительная область)

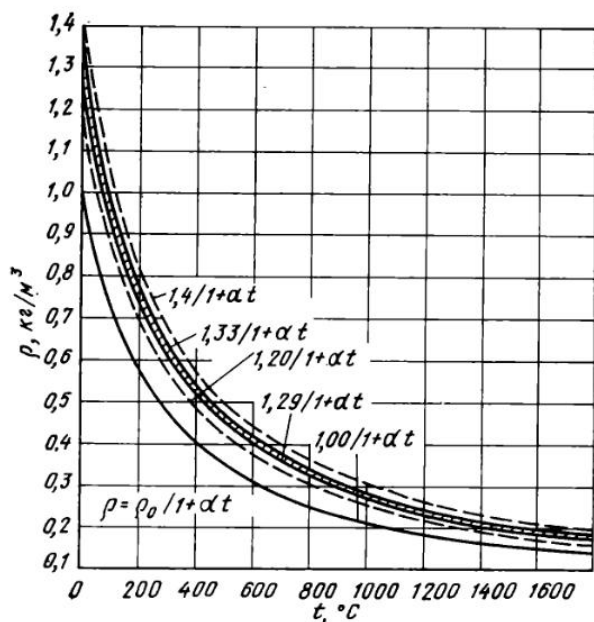


Таблица VIII-7

Количество воздуха и объем дыма для топлив с различной теплотой сгорания

Виды топлива	Теплота сгорания, кДж/кг (кДж/м³)	Теоретическое количество воздуха, м³/кг (м³/м³)	Объем продуктов сгорания, м³/кг (м³/м³)
Твердое топливо (1 кг, влажное)	12560	3,54	4,26
	16747	4,54	5,18
	20934	5,55	6,10
	25121	6,56	7,02
	29308	7,58	7,94
	33494	8,59	8,86
Нефть (1 кг)	40193	10,20	10,90
Генераторный газ (1 м³, сухой)	4605	0,97	1,84
	5024	1,05	1,90
	5443	1,13	1,97
	5862	1,21	2,03
	6280	1,29	2,10
Коксовый газ (1 м³)	15910	3,87	4,60
	16747	4,04	4,81
	17585	4,31	5,02
	18422	4,53	5,24
Доменный газ (1 м³)	3768	0,714	1,56
	4187	0,792	1,62
	4605	0,871	1,69
Смесь коксового и доменного газов (1 м³)	5862	1,23	2,05
	7536	1,67	2,47
	9211	2,11	2,00
	10886	2,55	3,32
Водяной газ	11242	2,35	2,90

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Таблица VIII-8

Состав и некоторые теплотехнические характеристики газообразного топлива

Газы	Состав газа, % (объемн)								Теплота сгорания газа, кДж/м³		Теоретический расход воздуха, м³/м³ газа	Объем продуктов сгорания, м³/м³ газа	Жаропроизводительность, °С		
	CO₂	O₂	C _m H _n	CO	H₂	CH₄	N₂	C ₂ H₂ + C ₂ H ₄ + C ₂ H ₆	Q _B	Q _H			без учета влаги воздуха, т/ж	с учетом влаги воздуха, т/ж	
	Газы высокой жаропроизводительности:														
водяной газ	6,3	0,2	—	38	51	0,5	4,0	—	11514	10467	2,2	2,7	2210	2180	
газ, полученный при газификации под высоким давлением (2,5 МН/м²)	3	0,3	0,7	18	56	18	4,0	—	17124	15114	3,5	4,2	2130	2100	
газ нефтезаводской (Москва)	—	—	27	3	12	58	—	50+50	42161	38435	9,9	10,8	2120	2090	
сжиженный газ	15	0,2	—	27	46	8	3	—	13063	11807	2,6	29,6	2110	2080	
двойной водяной газ	3	1	2	7	58	25	4	—	20306	18003	4,3	5,0	2100	2070	
коксовый газ из доменных углей	20,3	0,2	0,5	34	39	3	3	—	10844	9923	2,1	2,7	2050	2020	
паро-кислородный газ	15	—	3	16	39	24	3	—	18467	16580	4,0	4,7	2040	2010	
коксовый газ из сланца	1,0	—	—	—	—	20—60	3—10	20—30	—	33494	12,2	13,2	2030	2000	
нефтепромысловый газ*										62802					
газ полукоксовый из каменных углей	13	—	7	9	9	54	8	—	28219	25539	6,6	7,5	2060	2030	
природный газ	—	—	—	—	—	98	2	—	39523	35462	9,4	10,4	2040	2010	
Газы средней жаропроизводительности:															
смешанный газ (50% коксового и 50% доменного газов)	7	—	1	17	30	13	32	—	12100	10969	2,5	3,3	1980	1950	
генераторный газ из битуминозных топлив (прямой процесс газификации)	7	0,2	0,3	28	13	2,5	49	—	6406	6029	1,2	2,0	1750	1720	
Газы пониженной жаропроизводительности:															
смешанный генераторный газ из тощих топлив	6	—	—	27	13	0,6	53,4	—	5317	5024	1,0	1,8	1670	1640	
доменный газ (древесноугольный)	12	—	—	27	8	1,8	51,2	—	5150	4899	1,0	1,9	1590	1560	
воздушный газ	1	—	—	32,5	0,5	—	66	—	4187	4145	0,8	1,6	1560	1530	

Газы	Состав газа, % объемн.)							Теплота сгорания газа, кДж/м³		Теоретический расход воздуха, L _{теор} , м³/м³ газа	Объем продуктов сгорания V _{теор} , м³/м³ газа	Жаропроизводительность, °C		
	CO ₂	O ₂	C _m H _n	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	C ₂ H ₆ + +C ₃ H ₈	Q _B			Q _H	без учета влаги воздуха t _ж	с учетом влаги воздуха t _ж
	Доменный газ (коксовый)	10,5	—	—	28	2,7	0,3	58,5	—	4020	3936	0,8	1,6	1470
Газы низкой жаропроизводительности: ваграночный газ с использованием физического тепла (t=600°C) продувочный газ (антрацитовый) с использованием физического тепла (t=600°C) газ сажевых заводов продувочный газ (коксовый) с использованием физического тепла ваграночный газ холодный холодный продувочный (коксовый) газ холодный	13,1	—	—	13,1	—	—	73,8	—	1675	1674	0,3	1,2	1250	1230
	14,5	0,2	—	8,8	2,3	0,2	74	—	1507	1424	0,3	1,2	1180	1160
	4,8	1,4	—	4,9	11,6	2,0	75,3	—	2931	2596	0,5	1,4	1180	1160
	17,5	0,2	—	5,0	1,3	—	76	—	795	754	0,1	1,1	950	930
	13,1	—	—	13,1	—	—	73,8	—	1675	1675	0,3	1,2	860	840
	14,5	0,2	—	8,8	2,3	0,2	74	—	1507	1424	0,3	1,2	770	750
	17,5	0,2	—	5,0	1,3	—	76	—	795	754	0,1	1,1	470	450

* Содержание этана 12—20% (см. табл. VII-8)

Таблица VIII-9

Теплотехнические характеристики некоторых нефтепромысловых (полупных) газов

Месторождение	Теоретический объем воздуха L _{теор} , м³/м³	Объем продуктов сгорания, м³/м³		Отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания B		Энтальпия продуктов сгорания, кДж/м³		Жаропроизводительность (при сжигании в абсолютном сухом воздухе) t _ж , °C	Жаропроизводительность (при сжигании в воздухе, содержащем 1% влаги) t _ж , °C	RO ₂ тап сухих продуктов сгорания, % (объемн.)
		V _{сух}	V _{теор}	V _{сух}	V _{теор}	t _{сух}	t _в			
		Туймазинское	12,3	11,5	13,7	0,84	0,83	4061	3433	2040
Туймазинское	15,6	14,2	17,1	0,83	0,83	4187	3475	2080	2050	13,2
Мухановское	14,6	13,3	16,0	0,83	0,83	4145	3475	2080	2050	13,0
Мухановское	16,1	14,7	17,6	0,83	0,83	4187	3475	2080	2050	13,2
Ромашкинское	15,6	14,3	17,1	0,83	0,83	4187	3475	2080	2050	13,2
Шугуровское	8,7	8,4	9,9	0,84	0,84	3936	3308	1870	1940	12,6

Примечание. Теплотехнические характеристики подсчитаны для газов, состав которых приведен в табл. VII-8

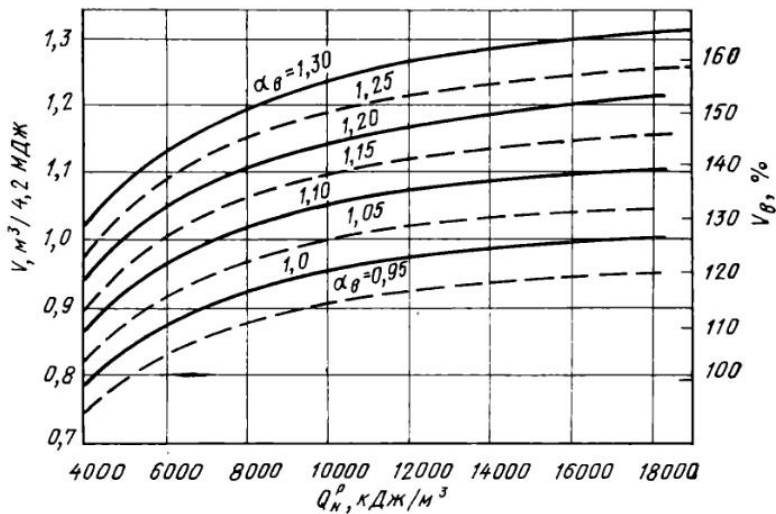


Рис. 62. Зависимость количества V_B , необходимого для сжигания коксодоменной смеси, от теплоты сгорания газа Q_H^p и коэффициента расхода воздуха α_B . За 100% принято количество воздуха, необходимое для сжигания доменного газа при $\alpha \approx 1$

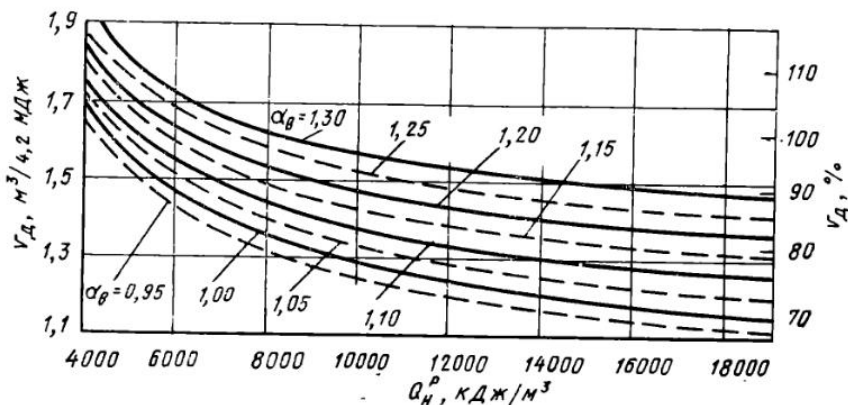


Рис. 63. Зависимость количества дыма V_D от теплоты сгорания смешанного газа Q_H^p и коэффициента расхода воздуха α_B . За 100% принято количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании доменного газа при $\alpha = 1$.

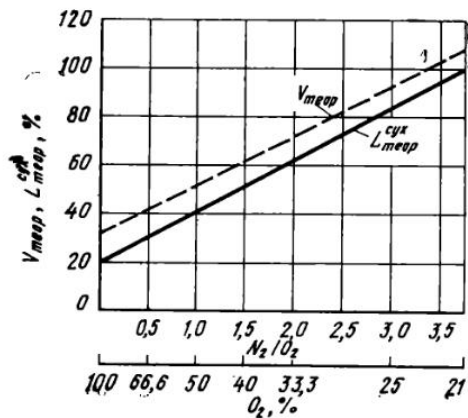


Рис. 64. Зависимость расхода сухого воздуха $L_{\text{теор}}$ и выхода продуктов сгорания $V_{\text{теор}}$ от содержания кислорода в дутье

Таблица VIII-10

Состав и теплотехнические характеристики некоторых коксовых газов

Газы (условное обозначение)	Состав газов, % (объемн).						Теплота сгорания Q_H , кДж/м ³	Объем сухих продуктов сгорания $V_{сух}$, м ³ /м ³	Объем влажных продуктов сгорания $V_{теор}$, м ³ /м ³	Отношение сухих и влажных продуктов сгорания B	Максимальное содержание CO_2 в продуктах сгорания RO_2 (объемн.), %	Энтальпия сухих продуктов сгорания $i_{сух}$, кДж/м ³	Энтальпия продуктов сгорания $i_{в}$, кДж/м ³	Жаропроизводительность $t_{ж}$, °С	
	C_2H_4	C_3H_6	CH_4	H_2	CO	CO_2									N_2
1	5,6	—	28,2	50,5	8,7	2,1	4,5	0,4	4,40	5,58	0,79	11,4	4522	3559	2130
1а	—	5,6	28,2	50,5	8,7	2,2	4,5	0,4	4,78	6,02	0,80	11,7	4480	3559	2130
2	2	—	22	56	6,0	3	10	1	3,47	4,51	0,77	10,1	4564	3517	2100
2а	—	2	22	56	6,0	3	10	1	3,59	4,65	0,77	10,3	4605	3517	2100
3	2,4	—	26,7	58	7,0	2,9	2,5	0,5	3,91	5,08	0,77	10,6	4626	3559	2130
3а	—	2,4	26,7	58	7,0	2,9	2,5	0,5	4,07	5,25	0,77	10,7	4605	3559	2130

Примечание. В коксовых газах 1, 2, 3 тяжелые углеводороды состоят из этилена C_2H_4 , а в газах 1а, 2а, 3а — из пропилена C_3H_6 .

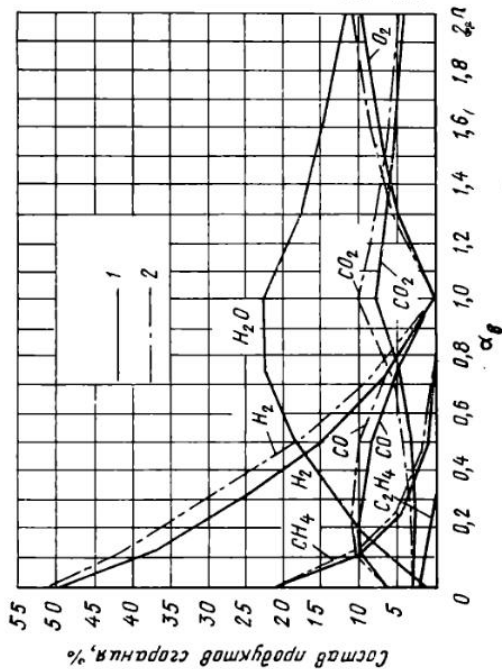


Рис. 65. Зависимость состава продуктов сгорания при сжигании коксового газа от коэффициента расхода воздуха α при влажных (1) и сухих (2) продуктах сгорания

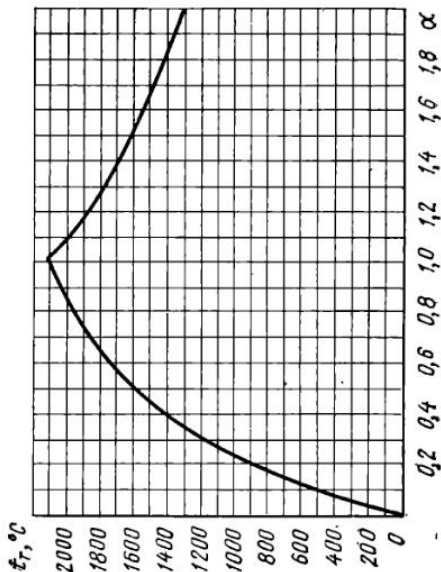


Рис. 66. Зависимость теоретической температуры t_T горения коксового газа от коэффициента расхода воздуха

Таблица VIII-11

Сравнительные теплотехнические характеристики различных топлив

Наименование топлива	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Нижняя объемная теплота сгорания $Q_{об}^P$, МДж/м ³	Нижняя массовая теплота сгорания $Q_{масс}^P$, МДж/кг	Теоретический расход воздуха $L_{теор}$, м ³ /м ³ газа	Расход воздуха на 1000 кДж, L_{1000} , м ³ /1000 кДж, на 4,2 МДж, $L_{4,2}$ (м ³ /4,2)	Объем продуктов сгорания $V_{теор}$, м ³ /м ³ газа	Объем продуктов сгорания на 1000 кДж, V_{1000} , м ³ /1000 кДж, на 4,2 МДж, $V_{4,2}$ (м ³ /4,2)	Плотность продуктов сгорания $\rho_{отж}$, г/кг/м ³
Углерод аморфный	—	—	34,1	8,90*	0,260 (1,09)	8,90*	0,260 (1,09)	1,40
Водород	0,090	10,8	121,0	2,38	0,220 (0,920)	2,88	0,268 (1,12)	1,09
Окись углерода	1,250	12,77	10,13	2,38	0,188 (0,788)	2,88	0,227 (0,95)	1,50
Метан	0,715	35,8	50,25	9,52	0,265 (1,11)	10,52	0,294 (1,23)	1,23
Этан	1,358	63,8	47,5	16,66	0,260 (1,09)	18,16	0,284 (1,19)	1,25
Пропан	2,030	91,4	46,4	23,80	0,260 (1,09)	25,80	0,284 (1,19)	1,26
Бутан	2,710	119,0	45,8	30,94	0,257 (1,08)	33,44	0,281 (1,18)	1,27
Пентан	3,214	146,0	45,5	38,08	0,260 (1,09)	41,08	0,281 (1,18)	1,27
Сероводород	1,52	22,3	29,1	7,14	0,262 (1,10)	7,64	0,327 (1,37)	1,28
Природный газ:								
дашавский	0,730	36,0	49,0	9,52	0,262 (1,10)	10,86	0,288 (1,21)	1,21
саратовский	0,780	35,18	44,80	9,23	0,263 (1,10)	10,30	0,292 (1,22)	1,17
ставропольский	0,735	35,18	47,30	9,30	0,263 (1,10)	10,42	0,296 (1,24)	1,19
шебелинский	0,782	37,21	48,20	9,85	0,263 (1,10)	10,90	0,287 (1,20)	1,25
Коксовый газ	0,590	16,71	27,75	4,06	0,244 (1,02)	4,82	0,289 (1,21)	1,16
Водяной газ	0,670	10,05	16,71	2,19	0,211 (0,88)	2,74	0,263 (1,10)	1,28
Доменный газ	1,30	4,18	3,22	0,82	0,196 (0,82)	1,67	0,403 (1,675)	1,40
Смесь коксового и доменного газов $Q_{н}^P = 8,37$ МДж/м ³	1,03	8,37	8,25	1,91	0,227 (0,95)	2,72	0,325 (1,360)	1,29
Генераторный газ ($Q_{н}^P = 4,77$ МДж/м ³)	1,04	4,77	4,61	1,00	0,211 (0,88)	1,85	0,387 (1,62)	1,34
Мазут:								
распылитель — воздух	—	—	43,4	10,71*	0,246 (1,03)	11,40*	0,263 (1,10)	1,28
распылитель — водяной пар	—	—	43,4	10,71*	0,246 (1,03)	12,64*	0,292 (1,22)	1,21
Каменный уголь (газовый)	—	—	25,58	7,10*	0,258 (1,08)	7,48*	0,273 (1,14)	1,33
Антрацит	—	—	31,40	7,28*	0,232 (0,97)	7,62*	0,244 (1,02)	1,31
Кокс	—	—	23,10	7,24*	0,263 (1,11)	7,20*	0,260 (1,09)	1,30

* Подсчитаны на 1 кг топлива.

Наименование топлива	Масса продуктов сгорания на 1000 кДж $C_{отж}$, г/1000 кДж (на 4,2 МДж, кг/4,2)	Объем воздуха и топлива, вступающих в реакцию $L+B$, м ³ /1000 кДж, (м ³ /4,2)	Состав продуктов сгорания % (объемн.)			Удельная энтальпия продуктов сгорания i_p' , МДж/м ³	Удельная энтальпия продуктов сгорания i_G' , МДж/кг	Жаропроводительность $t_{ж}$, °C
			CO ₂	H ₂ O	N ₂			
Углерод аморфный . . .	0,365 (1,53)	—	21,0	—	79,0	3,83	2,74	2365
Водород	0,294 (1,23)	0,313 (1,31)	—	34,7	65,3	3,75	3,39	2240
Окись углерода	0,340 (1,42)	0,268 (1,12)	34,7	—	65,3	4,33	2,93	2380
Метан	0,361 (1,51)	0,266 (1,11)	9,5	19,0	71,5	3,41	3,45	2040
Этан	0,355 (1,49)	0,277 (1,16)	11,0	16,5	72,5	3,49	2,80	2050
Пропан	0,361 (1,51)	0,272 (1,14)	11,6	15,4	73,0	3,54	2,81	2107
Бутан	0,358 (1,50)	0,267 (1,12)	12,0	15,0	73,0	3,55	2,79	2117
Пентан	0,358 (1,50)	0,267 (1,12)	12,2	14,6	73,2	3,55	2,79	2120
Сероводород	0,503 (2,11)	0,348 (1,46)	13,0	13,0	74,0	3,27	2,55	1900
Природный газ:								
дашавский	0,348 (1,46)	0,291 (1,22)	9,26	21,00	69,74	3,35	2,76	2040
саратовский	0,342 (1,43)	0,292 (1,22)	9,80	19,00	71,20	3,43	3,93	2060
ставропольский	0,347 (1,45)	0,292 (1,22)	9,40	20,0	70,60	3,38	2,72	2040
шебелинский	0,361 (1,51)	0,290 (1,21)	9,7	18,1	72,2	3,35	2,68	2020
Коксовый газ	0,335 (1,40)	0,304 (1,27)	7,9	22,1	70,0	3,46	2,98	2070
Водяной газ	0,337 (1,41)	0,299 (1,25)	6,4	28,6	65,0	3,85	3,03	2210
Доменный газ	0,557 (2,35)	0,435 (1,82)	23,0	3,0	74,0	2,50	1,78	1487
Смесь коксового и доменного газов $Q_n^p = 8,37$ МДж/м ³	0,418 (1,75)	0,347 (1,45)	14,0	14,5	71,5	3,07	2,36	1824
Генераторный газ ($Q_n^p = 4,77$ МДж/м ³)	0,519 (2,17)	0,418 (1,75)	17,1	6,7	76,2	2,59	1,94	1600
Мазут:								
распылитель — воздух	0,336 (1,41)	—	13,5	12,3	74,2	3,08	2,93	2245
распылитель — водяной пар	0,352 (1,47)	—	10,7	21,0	68,3	3,39	2,81	2050
Каменный уголь (газовый)	0,364 (1,52)	—	17,1	8,0	74,9	3,68	2,78	2180
Антрацит	0,320 (1,34)	—	21,1	3,0	75,9	4,12	2,65	2290
Кокс	0,340 (1,42)	—	20,5	1,3	78,2	4,03	3,09	2200

КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА

Определение качества отдельных видов топлива и их сравнительную оценку можно выполнять по различным показателям: теплоте сгорания, теоретической температуре горения, энтальпии 1 м³ продуктов сгорания и др. Однако более удобной величиной является термодинамический коэффициент использования тепла топлива (КИТ) в промышленной печи. Это — универсальный коэффициент, отражающий одновременно термодинамическую, техническую и экономическую стороны проблемы использования топлива. Он учитывает не только внутренние свойства топлива, но и условия его использования в печи — недожог, обогащение дутья кислородом и др. Величину КИТ определяют с учетом возможности возвращения тепла в рабочее пространство печи за счет использования отходящих продуктов сгорания для подогрева газа и воздуха горения.

В трактовке И. Д. Семикина формула для определения коэффициента использования тепла топлива имеет вид:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф.г}} + Q_{\text{ф.в}} - Q_{\text{д}} - q_{\text{нед}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}},$$

- где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая теплота сгорания топлива;
 $Q_{\text{ф.г}}$ — физическое тепло газа, поступающего в рабочее пространство печи;
 $Q_{\text{ф.в}}$ — физическое тепло воздуха, подаваемого для сжигания топлива;
 $Q_{\text{д}}$ — физическое тепло дыма, покидающего рабочее пространство печи;
 $q_{\text{нед}}$ — недожог топлива; химическое тепло дыма, оставшееся не выделенным в рабочем пространстве печи из-за химического или механического недожога, либо вследствие диссоциации молекул продуктов сгорания.

Расчет КИТ вводят на 1 м³ горючего газа, как правило, в границах объема рабочего пространства печи. Значения $Q_{\text{ф.г}}$ и $Q_{\text{ф.в}}$ представляют собой величины физического тепла, полученного за счет использования тепла отходящего дыма в рекуператорах или регенераторах. При подогреве компонентов горения за счет других источников тепла либо поступления в горячем виде, эту величину следует учитывать в $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$.

Физический смысл КИТ состоит в том, что он показывает долю тепла топлива, оставшуюся в рабочем пространстве печи. Это то тепло, которое может быть использовано на покрытие потерь тепла рабочим пространством и совершение полезной работы нагрева материалов или изделий в печи. Остальная часть тепла уносится отходящими продуктами сгорания.

Значение КИТ теоретически может меняться от 0 до 1.

Величина КИТ для различных видов топлива в зависимости от температуры уходящего дыма, температуры подогрева газа и воздуха за счет тепла дыма и коэффициента расхода воздуха представлена на рис. 67--73.

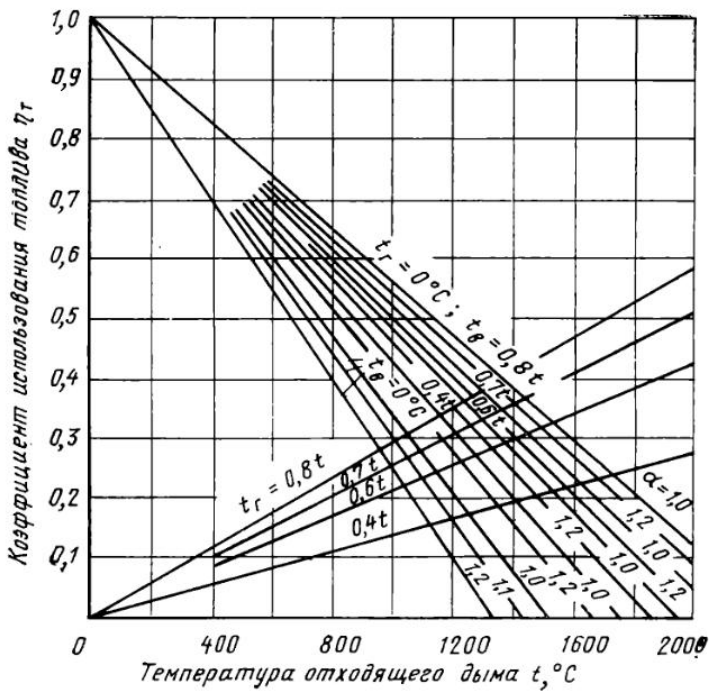


Рис. 67. Коэффициент использования тепла КИТ η_T домашнего газа. $Q_{\text{H}}^{\text{д.г}} = 4174 \text{ кДж/м}^3$

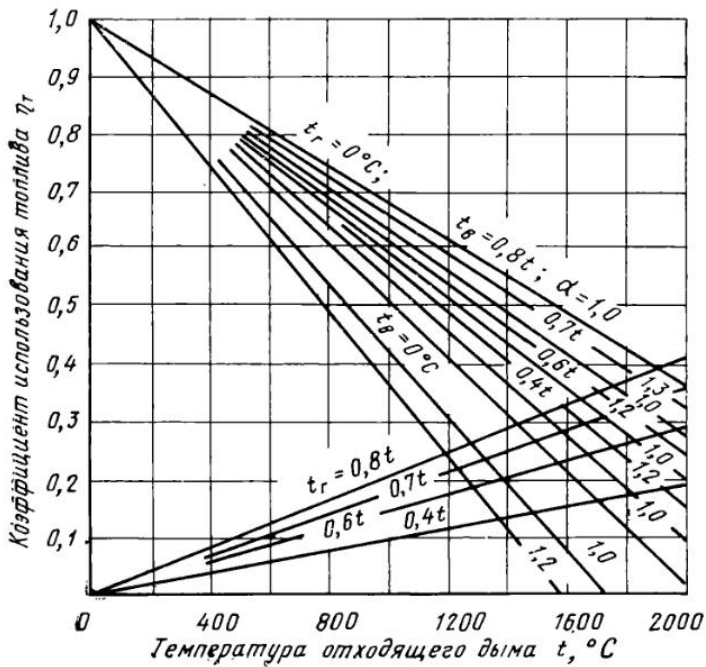


Рис. 68. Коэффициент использования тепла η_T генераторного газа с $Q_{\text{H}}^{\text{г.г}} = 6070 \text{ кДж/м}^3$

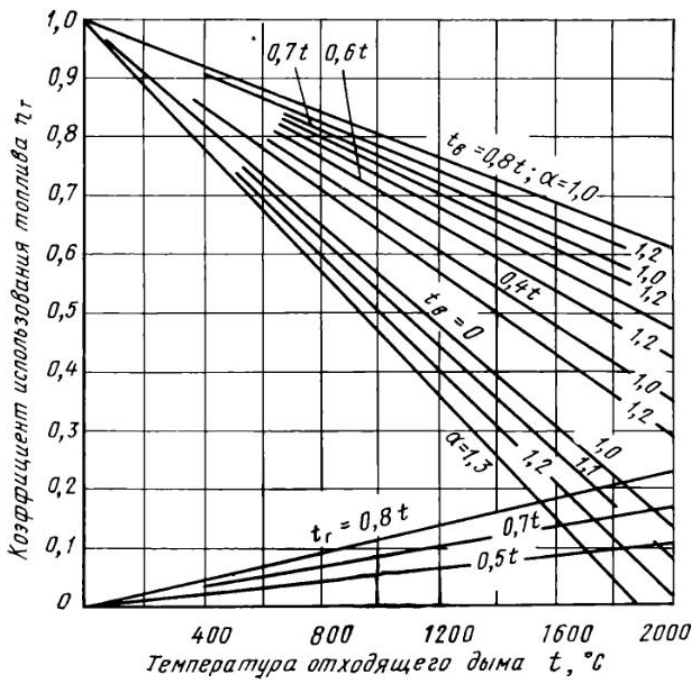


Рис. 69. Коэффициент использования тепла η_T водяного газа с теплотой сгорания $Q_{\text{H}}^{\text{B.Г}} = 10467 \text{ кДж/м}^3$

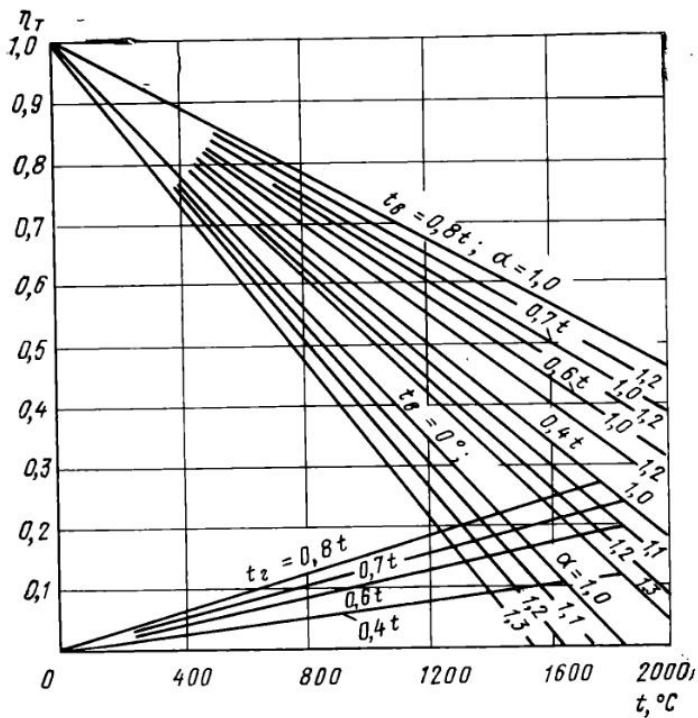


Рис. 70. Коэффициент использования тепла η_T смеси коксового и доменного газов с $Q_{\text{H}}^{\text{K.Д}} = 8374 \text{ кДж/м}^3$

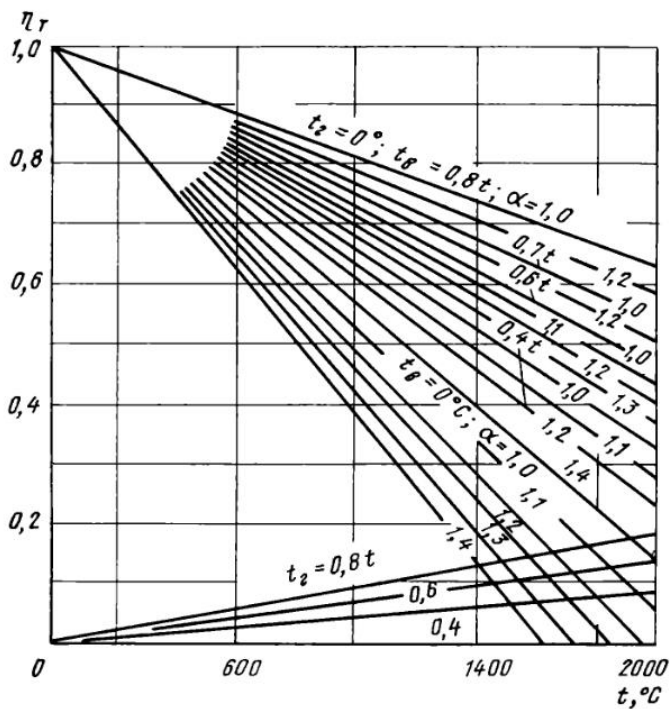


Рис. 71. Коэффициент использования тепла η_T коксового газа с тепловой сгорания $Q^{K.Г} = 16660$ кДж/м³

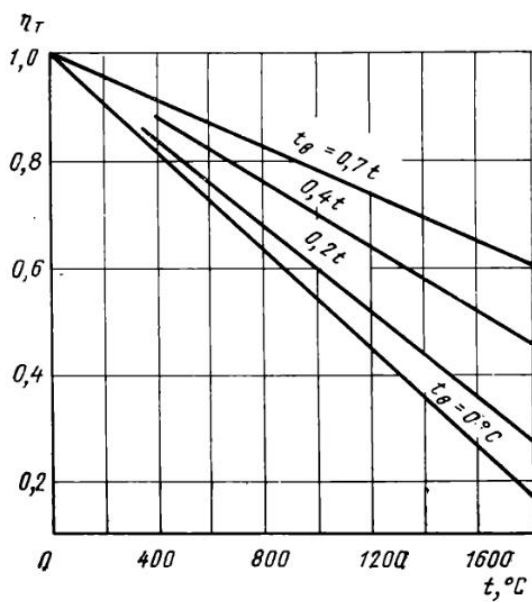


Рис. 72. Коэффициент использования тепла η_T метана

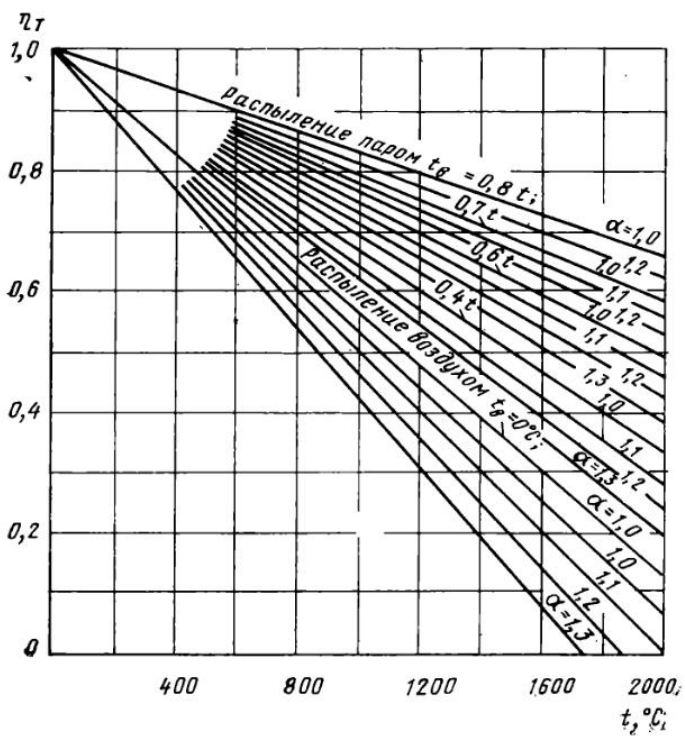


Рис. 73. Коэффициент использования тепла η_T мазута; для нефти $Q_H = 43815$ кДж/м³

МЕХАНИКА ГАЗОВ

Условные обозначения

- a — коэффициент температуропроводности, м²/ч, м²/с;
 L^2T^{-1} ;
- B, B — барометрическое давление, Н/м²; $L^{-1}MT^{-2}$;
- B_1, b — характеристики струи;
- a, b, l, s — линейный размер, м; L ;
- $c_{ср}$ — средняя теплоемкость в интервале от 0 до $t^\circ\text{C}$;
 кДж/(кг $^\circ\text{C}$); $L^2T^{-2}\theta^{-1}$;
- c_p — теплоемкость при постоянном давлении,
 кДж/(кг $^\circ\text{C}$); $L^2T^{-2}\theta^{-1}$;
- c_v — теплоемкость при постоянном объеме, кДж/(кг $^\circ\text{C}$);
 $L^2T^{-2}\theta^{-1}$;
- c — истинная теплоемкость, кДж/(кг $^\circ\text{C}$); $L^2T^{-2}\theta^{-1}$;
- D, d — диаметр, линейный размер, м; L ;
- $d_{\text{эkv}}, d_{\text{гидр}}$ — гидравлический (эквивалентный) диаметр,
 $d_{\text{гидр}} = \frac{4F}{\rho}$ м; L ;
- E — кинетическая энергия секундного расхода, Дж/с;
 Вт; L^2MT^{-3} ;
- F, f — площадь поперечного сечения, м²; L^2 ;
- G — масса, кг; M ;
- G — расход по массе, кг/с; MT^{-1} ;
- g — ускорение свободного падения, м/с²; LT^{-2} ;
- H — полное давление вентилятора, Н/м², обозначается
 также паскаль; 1 Па = 1 Н/м²; $L^{-1}MT^{-2}$;
- H — напор столба жидкости, высота дымовой трубы,
 напор вентилятора, м; мм вод. ст.; L ;
- $h_{\text{пот}}$ — потери давления, Н/м², $L^{-1}MT^{-2}$; (мм вод. ст.; L);
- $h_{\text{тр}}$ — потери давления на трение, Н/м², $L^{-1}MT^{-2}$;
 (мм вод. ст.; L);
- $h_{\text{м.с}}$ — потери давления на местные сопротивления, Н/м²,
 $L^{-1}MT^{-2}$; (мм вод. ст.; L);
- Σh — суммарные потери давления, Н/м², $L^{-1}MT^{-2}$;
 (мм вод. ст.; L);
- h — давление; $h_{\text{дин}}$; $h_{\text{ст}}$; $h_{\text{геом}}$ — динамическое (скоростное), статическое, геометрическое давление,
 Н/м², $L^{-1}MT^{-2}$; (мм вод. ст.; L);
- i — удельная энтальпия (теплосодержание), кДж/кг,
 кДж/м³; L^2T^{-2} ; $L^{-1}MT^{-2}$;
- I — количество движения секундного расхода, Н;
 LMT^{-2} ;
- $k = \frac{c_p}{c_v}$ — показатель адиабаты;
- k_1, k_2, k_3 — коэффициенты усреднения скорости при определении соответственно: расхода, количества движения, кинетической энергии;
- L, l — длина, линейный размер, м; L ;

- M — молекулярная масса, кг/моль; M ;
 n — число оборотов, об/мин; T^{-1} ;
 P — давление, Н/м², $L^{-1}MT^{-2}$; (мм вод. ст.; L);
 P — периметр, м; L ;
 q — тепловой поток, Вт/м²; MT^{-3} ;
 $R, R_{\text{ф.ш}}$ — универсальная газовая постоянная по кислородной физической шкале, $(8316,96 \pm 0,34)$ Дж/(кмоль·°C); $L^2T^{-2}\theta^{-1}$;
 r, R — радиус, м; L ;
 r — теплота парообразования, кДж/кг; L^2T^{-2} ;
 r' — теплота плавления, кДж/кг; L^2T^{-2} ;
 Re — критерий Рейнольдса;
 T — температура по абсолютной шкале (Кельвина), К; θ ;
 t — температура по стоградусной шкале, °C; θ ;
 U — коэффициент инжекции;
 u — окружная скорость, м/с; LT^{-1} ;
 V — объем, м³; L^3 ;
 $v = \frac{1}{\rho}$ — удельный объем, м³/кг; L^3M^{-1} ;
 V — расход газа, производительность, м³/ч, м³/с; L^3T^{-1} ;
 ω — скорость, м/с; LT^{-1} ;
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); $MT^{-3}\theta^{-1}$;
 α — коэффициент скорости;
 β — коэффициент объемного расширения газа, 1/°C; θ^{-1} ;
 δ — средняя высота выступов поверхности, мм; L ;
 ζ — коэффициент гидравлического сопротивления;
 η — коэффициент вязкости, Н·с/м²; $L^{-1}MT^{-1}$;
 η — коэффициент полезного действия, к. п. д.;
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); $LMT^{-3}\theta^{-1}$;
 μ — коэффициент трения;
 $\mu = \varphi \cdot \alpha$ — коэффициент расхода;
 ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/ч; м²/с; L^2T^{-1} ;
 ρ — плотность, кг/м³; $L^{-3}M$;
 $\rho_{\text{нас}}$ — насыпная масса, плотность вещества с учетом пустот, в естественном виде, кг/м³; $L^{-3}M$;
 σ — коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м²; MT^{-2} ;
 τ — время, ч, с; T ;
 φ, ψ — коэффициент сжатия струи.

Индексы

- 'и'' — при рассмотрении газожидкостной системы относятся соответственно к паровой и жидкой фазе;
 0 — означает (если нет оговорок), что параметр относится к приведенным (нормальным) условиям: $P = 101\,325$ Н/м² (760 мм рт. ст.); $t = 0^\circ\text{C}$;
 t — означает, что параметр рассматривается при действительной температуре.

Примечание. В настоящее время в соответствии с системой СИ введена новая единица для измерения давлений — паскаль. 1 Па = 1 Н/м². 1 мм вод. ст. = 9,80665 Н/м² = 9,8065 Па. 1 мм вод. ст. \cong 10 Па или 1 мм вод. ст. = 1 да Па с ошибкой менее 2%.

ДАВЛЕНИЯ И НАПОРЫ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Одним из основных уравнений механики жидкости и газа является уравнение Бернулли. Для идеальной жидкости с постоянной плотностью оно записывается в виде

$$\frac{\rho \omega^2}{2} + P + \rho g z = \text{const Н/м}^2.$$

В этом уравнении каждое слагаемое имеет размерность энергии, отнесенной к единице объема [(Н·м)/м³ = Дж/м³ или Н/м²]. Такую единичную энергию именуют удельной энергией или напором и обозначают через h или H . Если энергию жидкости относить к единице силы тяжести, то уравнение Бернулли запишется

$$\frac{\omega^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z = \text{const м.}$$

В этом случае, каждое слагаемое имеет размерность Дж/Н = м.

Таким образом в системе СИ напор может измеряться либо в единицах длины (м), либо в единицах давления (Н/м²). В порядке исключения разрешается применение внесистемных единиц: мм вод. ст. и мм рт. ст.

По физическому смыслу первое слагаемое в уравнении Бернулли представляет собой кинетическую энергию, которой обладает движущаяся жидкость в рассматриваемом сечении потока; второе — запас потенциальной энергии, обусловленный абсолютным давлением в данном сечении; третье — потенциальная энергия положения частицы относительно плоскости сравнения.

Величину $\omega^2/2g$ именуют скоростным (динамическим) напором, $P/\rho g$ — пьезометрическим напором и z — геометрическим напором. Напоры могут быть выражены и в единицах давления.

Сумму геометрического и пьезометрического напоров называют статическим напором

$$h_{\text{ст}} = h_{\text{геом}} + h_{\text{пьеэ}} = z + P/\rho g.$$

Сумму статического и скоростного напоров именуют полным или гидродинамическим напором

$$h = h_{\text{ст}} + h_{\text{ск}}.$$

Перешедшую в тепло энергию («потерянную») обозначают через $h_{\text{пот}}$.

При установившемся движении реального газа сумма всех напоров (давлений) изотермически движущейся несжимаемой жидкости есть величина постоянная в любом поперечном сечении канала:

$$h_{\text{ск}} + h_{\text{пьеэ}} + h_{\text{геом}} + h_{\text{пот}} = \text{const}.$$

Давление различают абсолютное P_a и избыточное (над атмосферным) $P_{\text{и}}$. Избыточное давление может быть положительным или отрицательным (разрежение). Давление измеряется в ньютонах на

квадратный метр — Н/м² = Па — паскаль. В порядке исключения допускается применение внесистемной единицы — мм вод. ст.

Закон Паскаля. Внешнее давление, действующее на некоторый объем жидкости в каком-нибудь одном направлении, распределено равномерно по всему объему, занимаемому жидкостью (газом), и направлено перпендикулярно любой плоскости, ограничивающей объем жидкости.

Закон Гей-Люссака. При постоянном давлении объем газа прямо пропорционален, а его объемная масса обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$V_t = V_0 (1 + \beta t) = V_0 \frac{T}{273}; \quad V_{t_2} = V_{t_1} \frac{T_2}{T_1};$$

$$\beta = \frac{1}{273} = 0,00367;$$

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{(1 + \beta t)} = \rho_0 \frac{273}{T}; \quad \rho_{t_2} = \rho_{t_1} \frac{T_1}{T_2};$$

$$w_t = w_0 (1 + \beta t) = w_0 \frac{T}{273}; \quad w_{t_2} = w_{t_1} \frac{T_2}{T_1}.$$

Закон Бойля—Мариотта. При постоянной температуре газа произведение удельного объема на давление есть величина постоянная:

$$Pv = \text{const}; \quad v = v_0 \frac{P_0}{P}.$$

Уравнение Менделеева—Клапейрона характеризует состояние газа и устанавливает зависимость объема от температуры и давления:

$$Pv = RT,$$

где R — газовая постоянная.

$$v_2 = v_1 \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1}; \quad \rho_2 = \rho_1 \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2}.$$

Теорема Эйлера, или теорема импульсов, гласит, что разность количества движения газа, вытекающего из контура и втекающего в него, спроектированная на любую ось, равна сумме всех сил, действующих на газ, заключенный в данном контуре, спроектированных на ту же ось:

$$\frac{d}{d\tau} (\Sigma m w) = \Sigma P.$$

Уравнение неразрывности (сплошности) движения при установившемся течении имеет вид:

$$w_1 F_1 \rho_1 = w_2 F_2 \rho_2 \quad \text{при} \quad \rho_1 = \rho_2; \quad w_1 F_1 = w_2 F_2; \quad w = V/F.$$

Движение жидкости в каналах характеризуется критерием Рейнольдса:

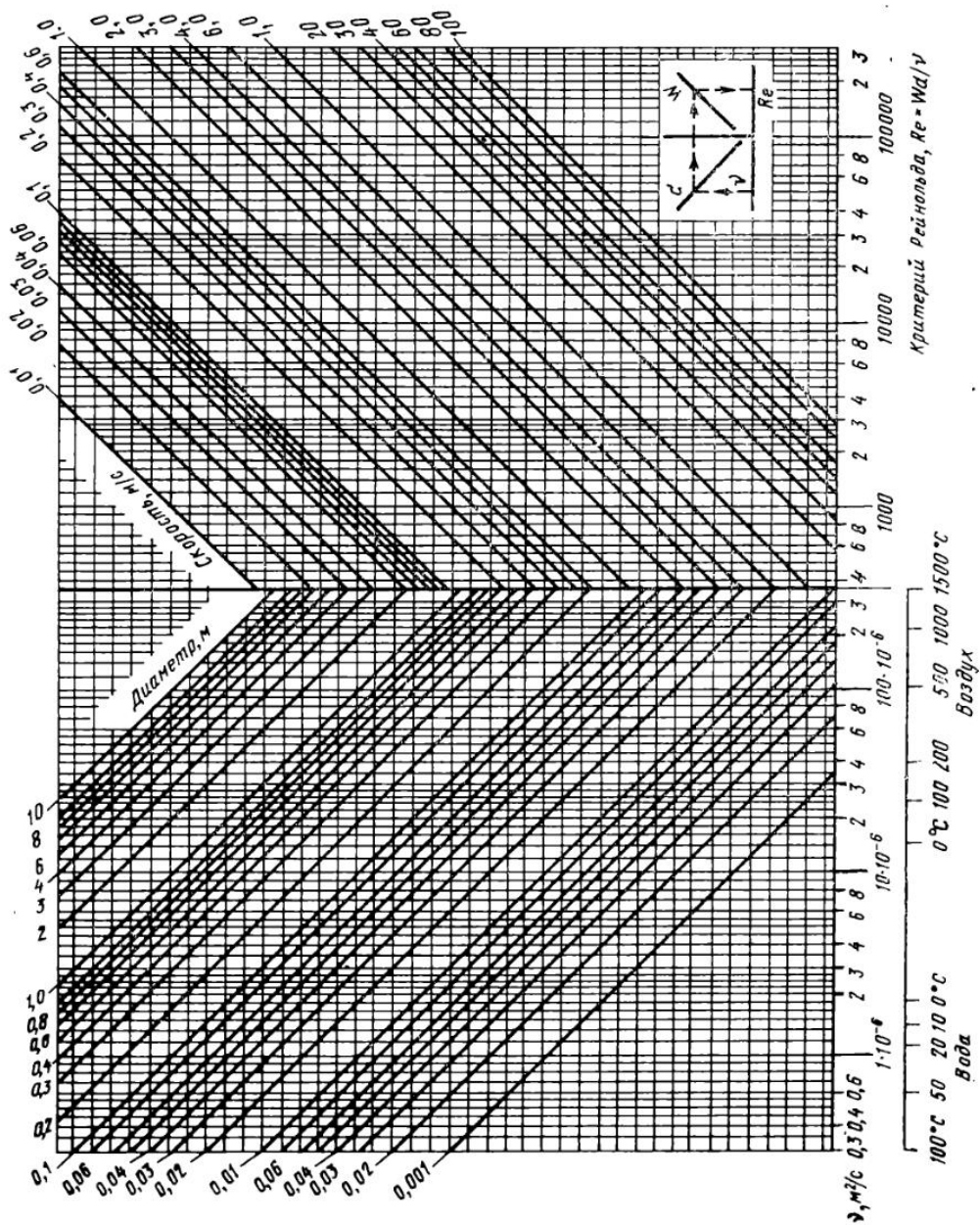
$$Re = \frac{w d}{\nu} = \frac{w d \rho}{\eta}.$$

При значении $Re < 2320$ наблюдается ламинарный режим движения и при $Re > 2320$ — турбулентный. Профиль распределения скоростей по сечению трубопровода описывается уравнением параболы.

Отношение средней скорости (по расходу) к максимальной именуется коэффициентом усреднения скорости при определении расхода $w_{cp}/w_{max} = k_0$.

Рис. 74. Номограмма для определения критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu} = \frac{\omega d \rho}{\eta}$$



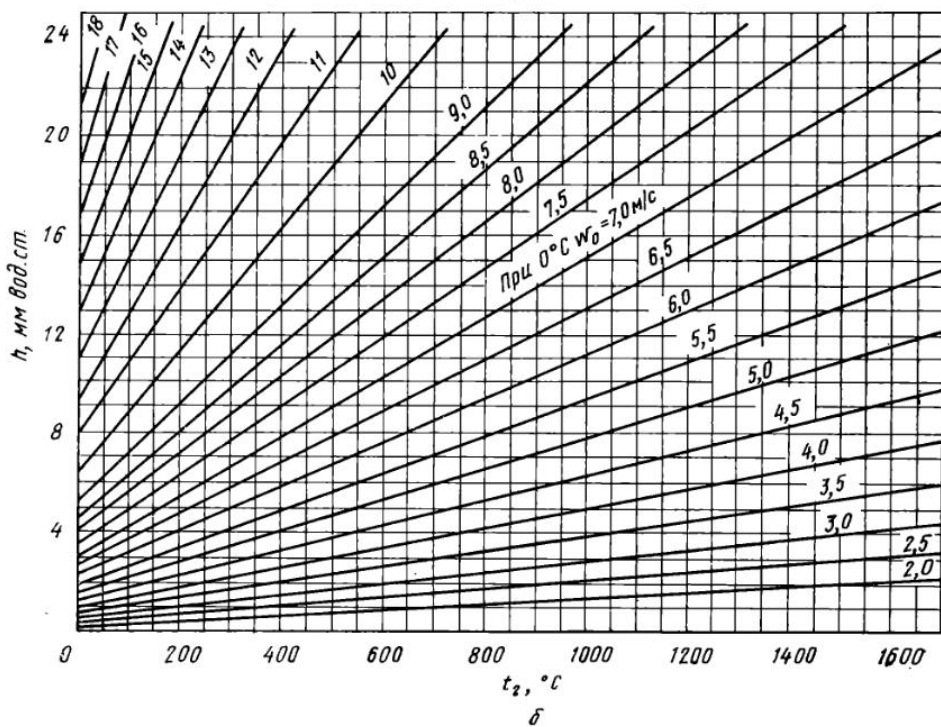
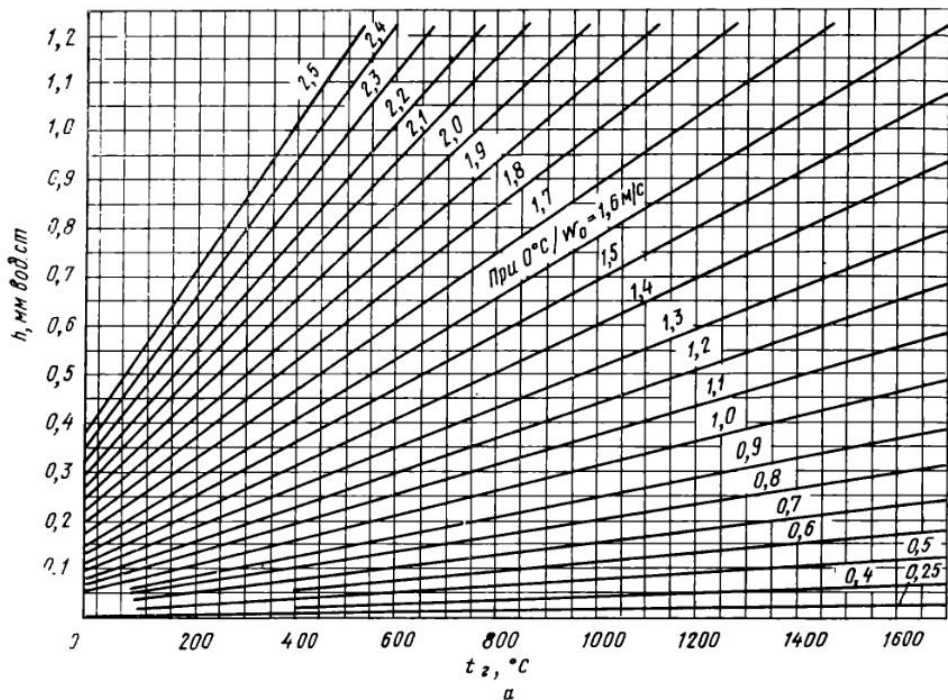


Рис. 75. Величина скоростного давления $h_{\text{дин}}$ при $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ и скорости газа w_0 , м/с:
 а — 0,25—2,5; б — 2,0—18,0

ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ

При движении жидкостей и газов по трубам и каналам происходит переход кинетической энергии потока в тепло — потеря давления $h_{\text{пот}}$. Различают потери давления двух видов: общие или потери давления на трение $h_{\text{тр}}$ и потери давления на местные сопротивления $h_{\text{м.с}}$. Измеряют потери давления в ньютонах на 1 метр квадратный или в миллиметрах водяного столба и они зависят от динамического давления — кинетической энергии движущегося потока газа или жидкости. Потери давления прямо пропорциональны динамическому (скоростному) давлению:

$$h_{\text{пот}} = \zeta h_{\text{дин}},$$

где ζ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом гидравлического сопротивления и по физическому смыслу представляющий собой количество динамических давлений, теряемых на том или ином гидравлическом сопротивлении.

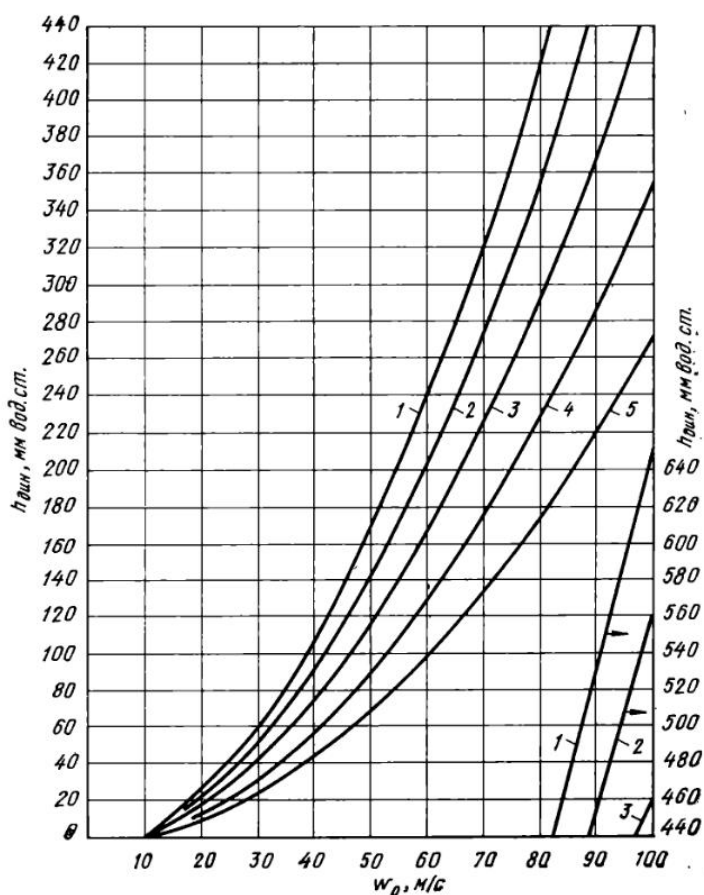


Рис. 76. Скоростное давление $h_{\text{дин}}$ при различных скоростях w_0 движения и плотности потока газов:
 1 — воздух ($\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$) и доменный газ; 2 — генераторный газ ($\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$); 3 — смешанный газ ($\rho = 0,9 \text{ кг/м}^3$, $Q_{\text{H}} = 10680 \text{ кДж/м}^3$); 4 — смешанный газ ($\rho = 0,7 \text{ кг/м}^3$, $Q_{\text{H}} = 14030 \text{ кДж/м}^3$); 5 — коксовый газ ($\rho = 0,53 \text{ кг/м}^3$)

ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ

При нахождении потерь на трение $h_{тр}$ коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta_{тр}$ определяется как произведение коэффициента трения μ на длину канала в калибрах $\frac{L}{d_0}$:

$$\zeta_{тр} = \mu \frac{L}{d_0}.$$

Коэффициент трения при ламинарном режиме ($Re \leq 2300$)

Коэффициент трения μ определяется по приведенным ниже графикам и формулам для соответствующей формы канала:

- круглое сечение $\mu = 64/Re$ (рис. 77);
- прямоугольное сечение (отношение сторон $a/b = 0 \div 1,0$), $\mu_{пр} = \varphi_1 \mu$ (рис. 78);
- кольцевое сечение $\mu_{кол} = \varphi_2 \mu$ (рис. 78).

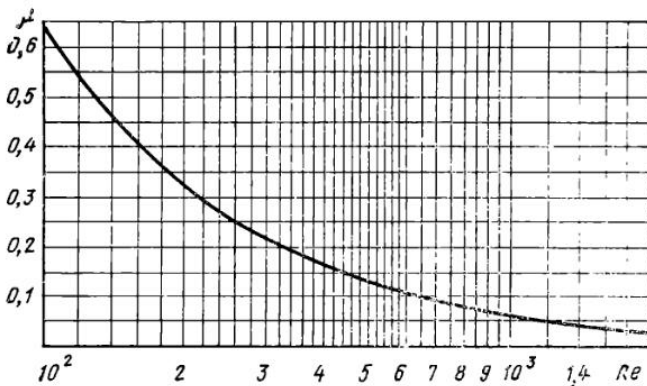


Рис. 77. Коэффициент трения μ при ламинарном режиме:

Re	100	200	300	400	500	600	700
μ	0,640	0,321	0,214	0,160	0,128	0,107	0,092
Re	800	900	1000	1100	1200	1300	
μ	0,080	0,071	0,064	0,058	0,053	0,049	
Re	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
μ	0,046	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032

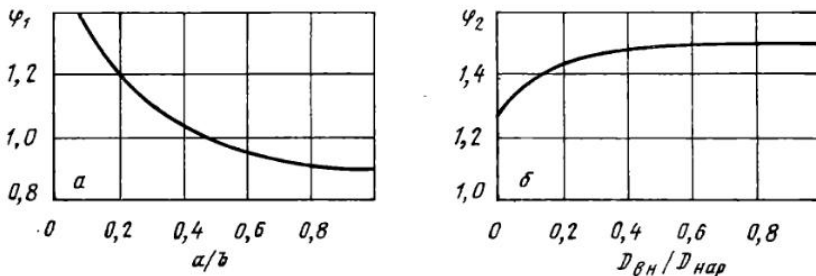


Рис. 78. Поправочные коэффициенты для определения коэффициентов трения в трубах прямоугольного (а) и кольцевого (б) сечений

Коэффициент трения при турбулентном режиме

Для труб с шероховатыми стенками коэффициент трения μ находят по приведенным ниже формулам и графикам. Среднюю высоту выступов шероховатости δ определяют по данным, приведенным ниже:

а) круглое сечение канала $\mu = \frac{1}{\left(2 \log 3,7 \frac{D_{вн}}{\delta}\right)^2}$;
 $\varepsilon = \frac{\delta}{D_{вн}}$; (рис. 79);

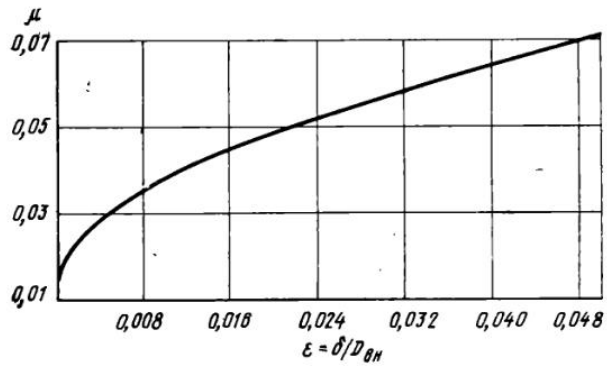


Рис. 79. Коэффициент трения μ при турбулентном режиме

- б) прямоугольное сечение при отношении сторон $a/b = 0,7 \div 1,0$;
 $\mu_{пр} = \varphi_3 \mu$ (рис. 80);
 в) кольцевое сечение $\mu_{кол} = \varphi_4 \mu$ (см. рис. 80).

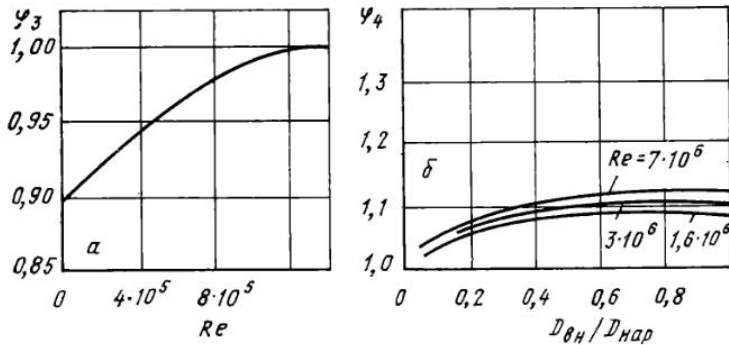


Рис. 80. Поправочные коэффициенты для определения коэффициента трения в трубе прямоугольного (а) и кольцевого (б) сечений

Таблица IX-1

Шероховатость (неравномерная) δ стенок металлических труб

Характер поверхности	δ , мм	Характер поверхности	δ , мм
Чистые цельнотянутые трубы из латуни, меди и оцинка	0,0015—0,0	Стальные трубы после одного года эксплуатации на газопроводе	0,12
Новые тщательно уложенные бесшовные стальные трубы	0,04—0,17	Стальные трубы, уложенные в обычных условиях	0,19
Цельнотянутые стальные и железные трубы после нескольких лет эксплуатации	0,19	Обычные оцинкованные железные трубы	0,39
		Обычные новые чугунные трубы	0,25÷0,42

Характер поверхности	δ, мм	Характер поверхности	δ, мм
Асфальтированные стальные трубы	0,12—0,21	Менее аккуратно уложенные новые или очищенные чугунные трубы	0,45
Чисто оцинкованные железные трубы	0,25	Грубо оцинкованные железные трубы	0,50
Новые чугунные трубы с залитыми и хорошо заглаженными стыками	0,31	Старые заржавленные железные трубы	0,60
Трубы из листового железа и хорошо заглаженные цементные трубы	0,33	Сильно заржавленные железные трубы	0,67
		Запыленные металлические трубы	0,75÷0,90

Таблица IX-2

Шероховатость (неравномерная) δ стенок труб, изготовленных из различных материалов (неметаллических)

Характер поверхности	δ, мм	Характер поверхности	δ, мм
Чистые трубы из стекла	0,0015÷0,01	Поверхность из чистого цемента	0,25÷1,25
Резиновый шланг	0,01÷0,03	Кирпич, покрытый глазурью	0,45÷3,0
Прорезиненный изнутри брезент хорошо натянутой трубы	0,02÷0,05	Штукатурка цементным раствором	0,45÷3,0
Очень шероховатый прорезиненный изнутри хлопчатобумажный шланг	0,20÷0,30	Кирпичная кладка на цементном растворе	0,80÷6,0
Хороший кожаный шланг	0,15	Бетонированные каналы	0,80÷9,0
Обычный непрорезиненный льняной или пеньковый шланг	0,50÷0,80	Облицовка из тесаного камня	1,25÷6,0
Березовая фанера (продольная)	0,025÷0,05	Обычная бутовая кладка на цементе	6,0÷17,0
Сосновая фанера (продольная)	0,10	Деревянные лотки из строганных досок	0,25—2,0
Деревянные трубы	0,25÷1,25	Деревянные лотки из нестроганных досок	0,45÷3,0
Керамические дренажные трубы	0,45÷6,0	Деревянные лотки из досок с наколоченными планками	0,80÷4,0
Покрытые глазурью канализационные трубы	0,25÷6,0		

ПОТЕРИ НА МЕСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Падение давления на местном сопротивлении находят по формуле $h_{м.с} = \zeta_{м.с} \cdot h_{дин}$. Местные сопротивления связаны с изменениями сечения или формы канала. Коэффициент местного сопротивления определяется геометрией данного участка тракта и практически не зависит от числа Re , так как в случаях расчета печных систем приходится иметь дело с турбулентным режимом движения в области автомодельности.

При нахождении потерь на местные сопротивления ($h_{м.с}$) коэффициент гидравлического (местного) сопротивления $\zeta_{м.с}$ определяют по приведенным ниже таблицам и графикам для соответствующего случая. В целях упрощения в дальнейшем опущены индексы «м.с» при коэффициенте местного сопротивления $\zeta_{м.с}$ и поставлены индексы, показывающие, к какой скорости он относится.

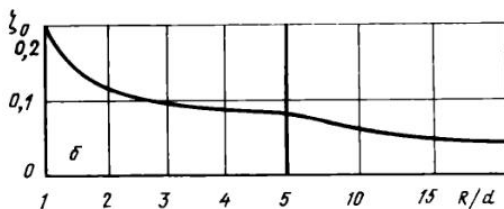
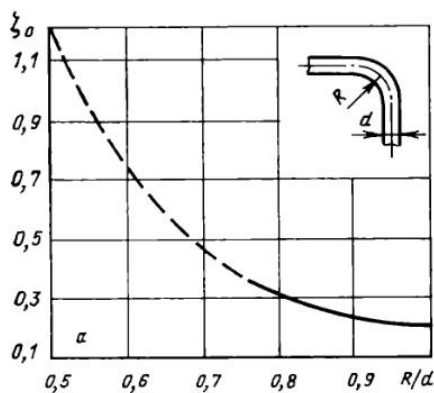


Рис. 81. Исходный коэффициент сопротивления плавных поворотов $\zeta_0 = f(R/d)$. Верхний рисунок для малых значений R/d

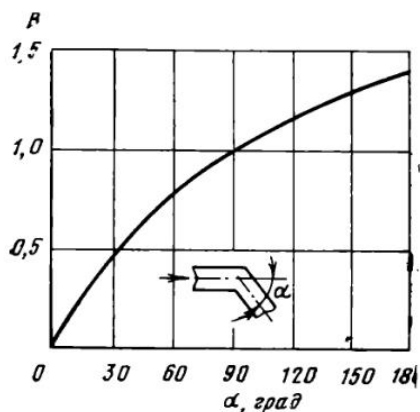


Рис. 82. Поправочный коэффициент B к коэффициенту сопротивления поворотов, зависящих от угла α поворота

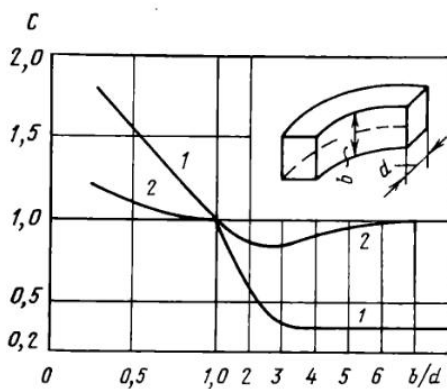


Рис. 83. Поправочный коэффициент C к коэффициенту сопротивления плавных поворотов, зависящих от формы сечения при b/d :
1 — 3—4; 2 — $\leq 1,5$

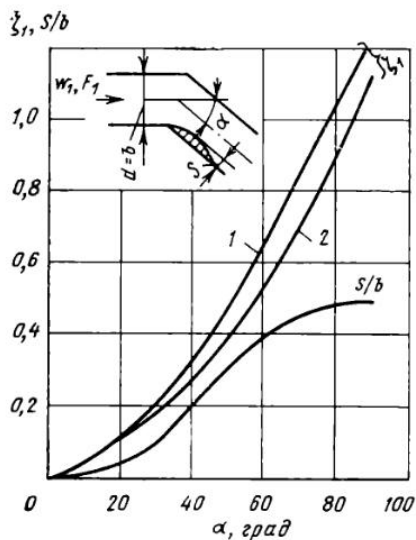


Рис. 84. Зависимость относительной ширины s/b вихревой зоны и коэффициента сопротивления ζ_1 колен от угла поворота α :
1 — шероховатое колено; 2 — гладкое колено

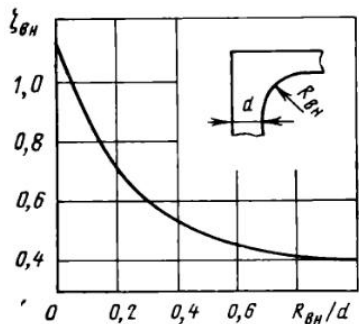


Рис. 85. Исходный коэффициент сопротивления резких поворотов с закругленной внутренней кромкой; при $R_{вн}/d > 1$ $\zeta_{вн} = 0,39$

1. Изменение направления потока

При выполнении канала с обеими закругленными кромками — внутренней и наружной ($R_{вн} \neq 0$; $R_{н} > R_{вн}$) — поворот именуется плавным. Для плавного поворота коэффициент местного сопротивления определяют по формуле $\zeta = \zeta_0 \cdot B \cdot C$. Множители правой части уравнения учитывают: ζ_0 — радиус кривизны R (рис. 81); B — угол поворота α (рис. 82) и C — размеры поперечного сечения; b — размер изогнутой стороны канала, d — размер плоской стороны канала (рис. 83). При круглом или квадратном сечении $C = 1,0$.

Коэффициент местного сопротивления ζ_1 резкого поворота ($R_{вн} = R_{н} = 0$), так называемого «колена», определяют по рис. 84. Для канала прямоугольного сечения $\zeta = \zeta_1 \cdot C$.

Коэффициент местного сопротивления резкого поворота с закругленной внутренней кромкой ($R_{вн} > 0$; $R_{н} = 0$) подсчитывают по формуле $\zeta = \zeta_{вн} \cdot B$, где $\zeta_{вн}$ определяется по рис. 85 в зависимости от отношения $R_{вн}/d$, а B по графику рис. 82 в зависимости от угла поворота. Повороты с закруглением одной наружной кромки ($R_{вн} = 0$; $R_{н} > 0$) применять не следует, так как они имеют большее сопротивление, чем повороты без закруглений. Влияние закругления одной из кромок канала на коэффициент местного сопротивления показано на рис. 86.

Значение коэффициента сопротивления ζ_1 для спаренного колена показано на рис. 87, а, б. Для канала прямоугольного сечения $\zeta = \zeta_1 \cdot C$.

Для спаренных колен с углом $\alpha = 90^\circ$ коэффициент местного сопротивления приведен на рис. 88. В случае прямоугольного сечения канала ζ_1 необходимо умножить на поправочный коэффициент C (см. рис. 83).

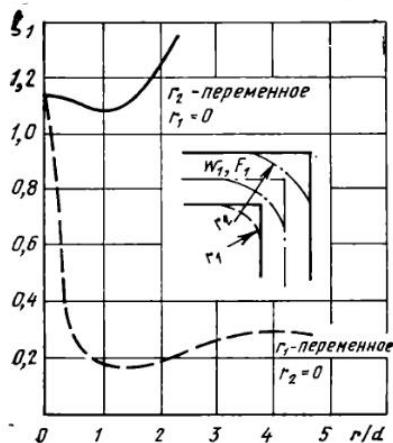


Рис. 86. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 колена от относительного радиуса закругления r/d внутренней и внешней стенок

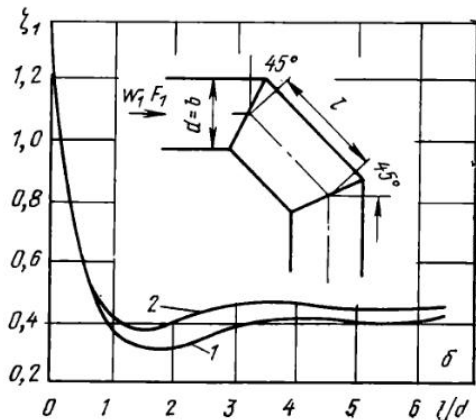
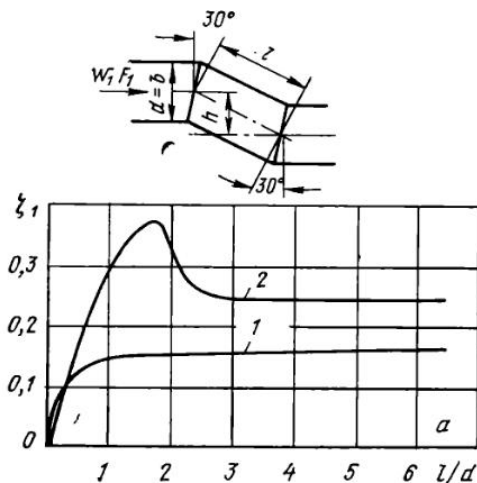


Рис. 87. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 колена, составленного из двух колен до 30° (а) и по 45° (б), от относительного расстояния l/d при $Re = 230000$:
1 — гладкое колено; 2 — шероховатое колено

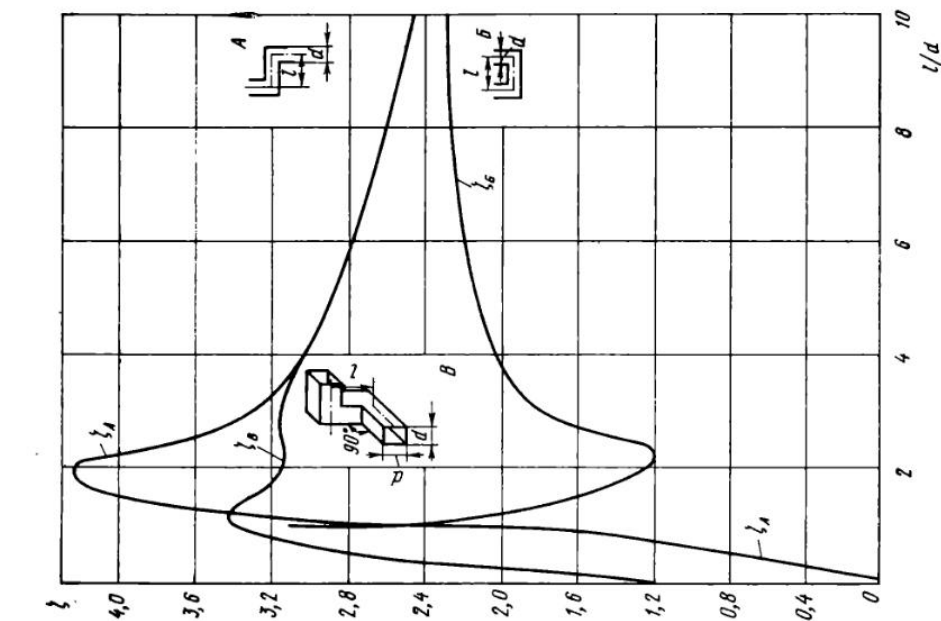


Рис. 88. Коэффициент сопротивления ζ сваренного колена

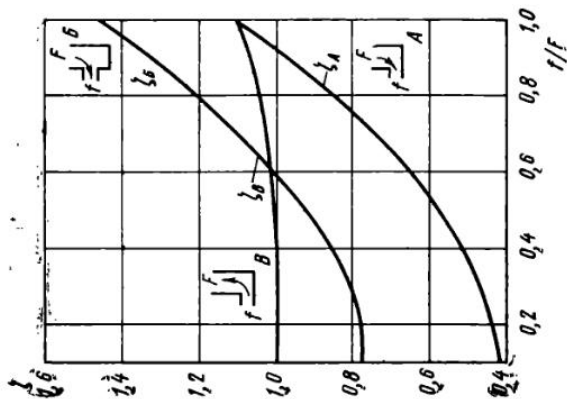


Рис. 89. Коэффициент сопротивления колена с изменением сечения

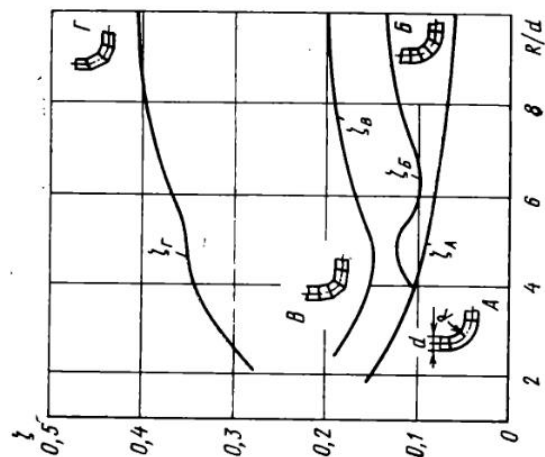


Рис. 90. Коэффициент местного сопротивления сегментного отвода

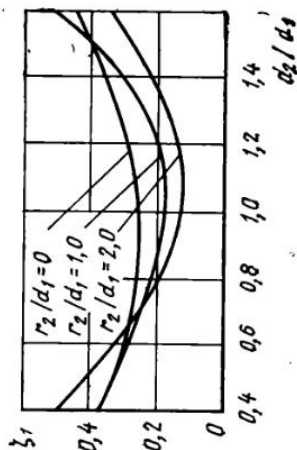


Рис. 91. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 отвода от отношения сторон d_2/d_1 при постоянном отношении $r_1/d_1=1$ и при различных отношениях r_2/d_1

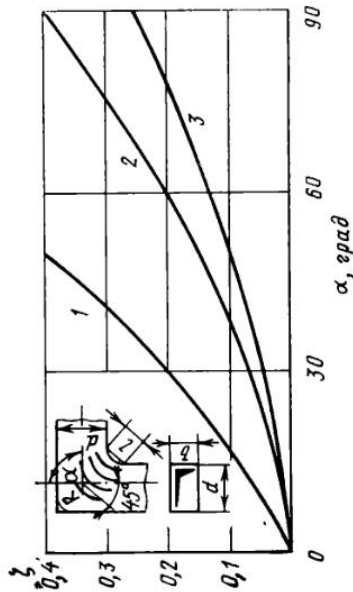


Рис. 93. Коэффициент сопротивления в колесе с направляющими лопатками:
1 — без лопаток; с лопатками при: 2 — $R/d=0,1$; 3 — $R/d=0,25$

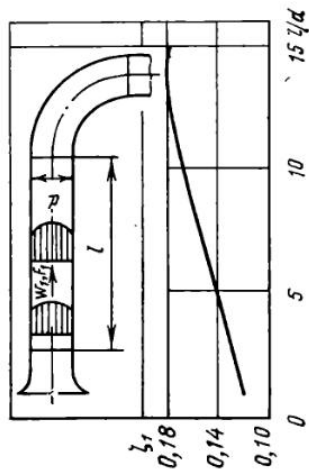


Рис. 94. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 от относительной длины начального (входного) участка l/d

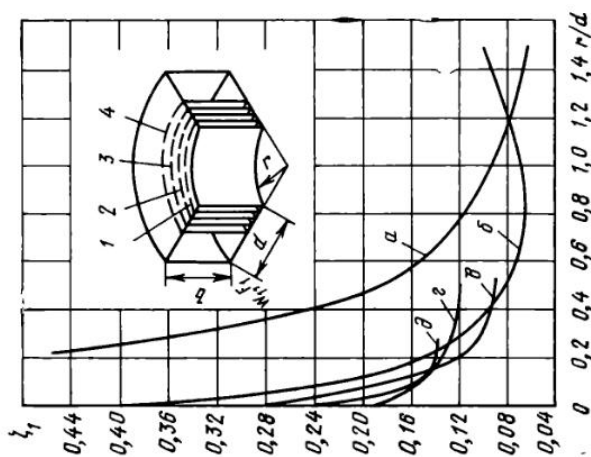


Рис. 92. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 отвода с концентрическими лопатками и без них от относительного радиуса закругления r/d :
а — без лопаток; б — одна лопатка; в — две лопатки; г — три лопатки; д — четыре лопатки; 1, 2, 3, 4 — соответственно лопатки первая, вторая, третья, четвертая

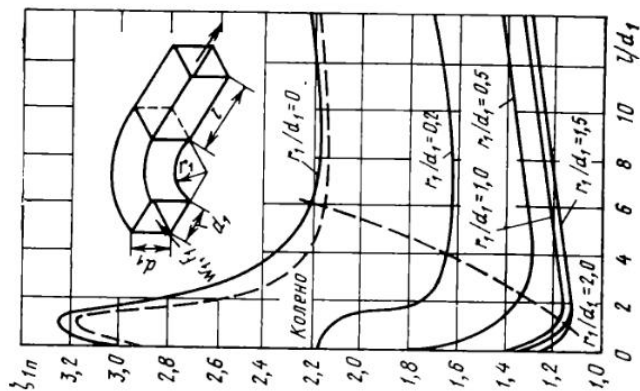


Рис. 95. Зависимость коэффициента полного сопротивления ζ_{1n} отводов от относительной длины начального входного участка l/d при различных значениях r_1/d_1

Для колена с изменением сечения и углом поворота $\alpha=90^\circ$ значения ζ_1 приведены на рис. 89 и 91.

Для сегментного отвода значения ζ_1 приведены на рис. 90. Практически более четырех сегментов делать не рекомендуется.

Влияние направляющих лопаток на величину коэффициента местного сопротивления приведено на графиках рис. 92 и 93.

Зависимость коэффициента местного сопротивления отводка от относительной длины входного и выходного участков показана на рис. 94 и 95. Наименьшая относительная длина выходного участка, дающая величину коэффициента полного сопротивления, близкую к минимуму, выделена пунктирной линией, нанесенной на рис. 95.

Для обвода и «утки» коэффициент местного сопротивления приведен на рис. 96, а, б. При построении обвода пользуются зависимостями

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{2h} \text{ и } R = \frac{l}{4 \cdot \sin \alpha},$$

при построении «утки»

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{h} \text{ и } R = \frac{l}{2 \sin \alpha}.$$

При прямоугольном сечении канала ζ_1 необходимо умножать на поправочный коэффициент C (см. рис. 83).

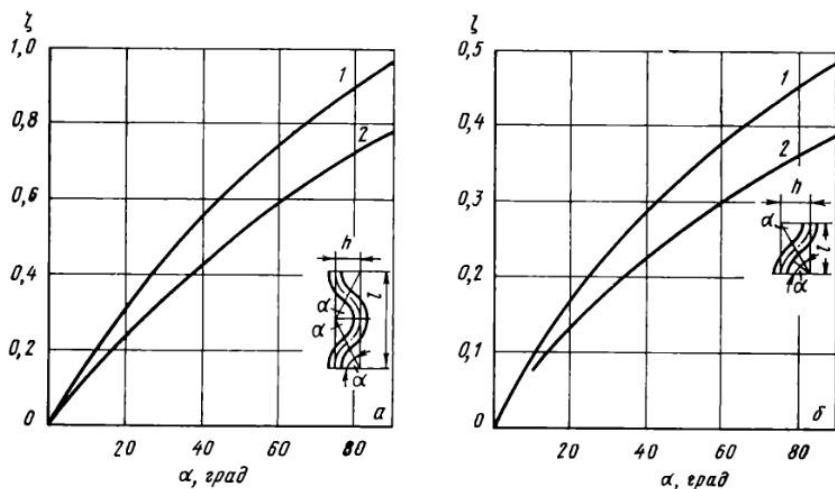


Рис. 96. Коэффициент местного сопротивления ζ обвода (а) и «утки» (б) при R/d :
1 — 1; 2 — 1,5

Для поворотов-конфузоров принимаются те же коэффициенты местного сопротивления, что и для соответствующих поворотов с равными сечениями, но относятся они к средней скорости, равной полусумме входной и выходной скоростей. При этом определяющие геометрические параметры поворотов $\frac{R}{d}$; $\frac{b}{d}$ и $\frac{R_{вн}}{d}$ принимаются по входному сечению.

Расчет поворотов-диффузоров ведется по максимальной, т. е. по входной скорости, а коэффициенты местного сопротивления подсчитываются так же, как и для соответствующих поворотов с равными сечениями. При этом резкие повороты без закруглений и повороты с закруглением внутренней кромки при $\frac{R_{вн}}{d} \leq 0,1$ дополнительных по-

правок из-за увеличения сечения не требуют. Для резких поворотов-диффузоров с закругленной внутренней кромкой при $\frac{R_{вн}}{d} > 0,1$ коэффициент сопротивления подсчитывается по формуле

$$\zeta = \zeta_{вн} \cdot B \left(\frac{F}{f} \right)^2.$$

Для плавных поворотов-диффузоров коэффициент сопротивления подсчитывается по формуле

$$\zeta = \zeta_0 \cdot B \cdot C \left(\frac{F}{f} \right)^3;$$

определяющие геометрические параметры $\left(\frac{R}{d}, \frac{b}{d}, \frac{R_{вн}}{d} \right)$ при расчете поворотов-диффузоров принимаются по входному сечению (B и C , см. рис. 82, 83).

Поворот в пучках труб. Сопротивление пучка труб рассчитывают независимо от наличия поворота, а коэффициент местного сопротивления поворота ζ при повороте на $180, 90$ и 45° принимают равным соответственно 2; 1,0 и 0,65. Расчетная скорость потока определяется по живому сечению.

При изменении сечения газохода в начале и конце поворота в пучке местное сопротивление поворота рассчитывают по среднеарифметической из начальной и конечной скоростей потока с теми же значениями ζ .

Поворот в пучке на 180° рассчитывают по среднеарифметическому значению из трех скоростей — в начале, середине и конце поворота.

2. Изменение скорости потока

При резком изменении сечения канала расчет коэффициента местного сопротивления выполняют по графикам: для расширения по рис. 97, а и для сужения по рис. 97, б. Графики пригодны для определения ζ_1 сужения и расширения канала любой формы и при длине расширения $l > 8D$. Коэффициент местного сопротивления ζ_1 относится

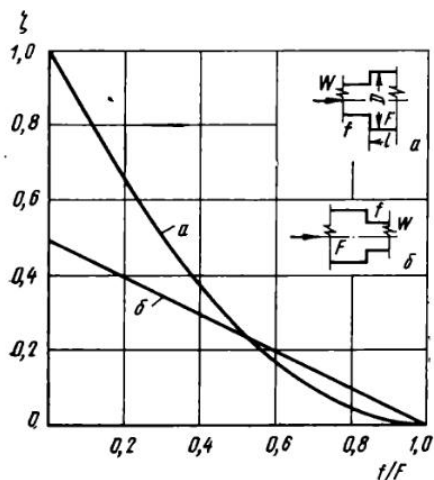


Рис. 97. Коэффициент сопротивления для внезапного расширения (а) и сужения (б)

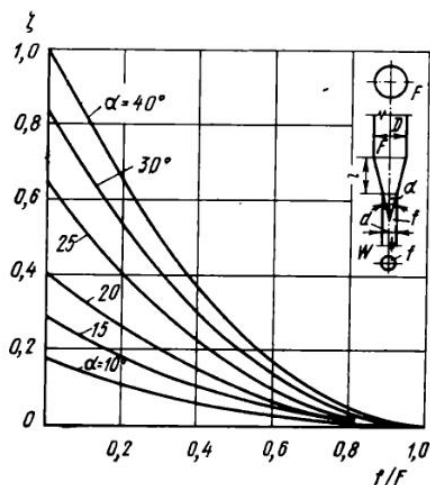


Рис. 98. Коэффициент сопротивления диффузора на выровненном потоке

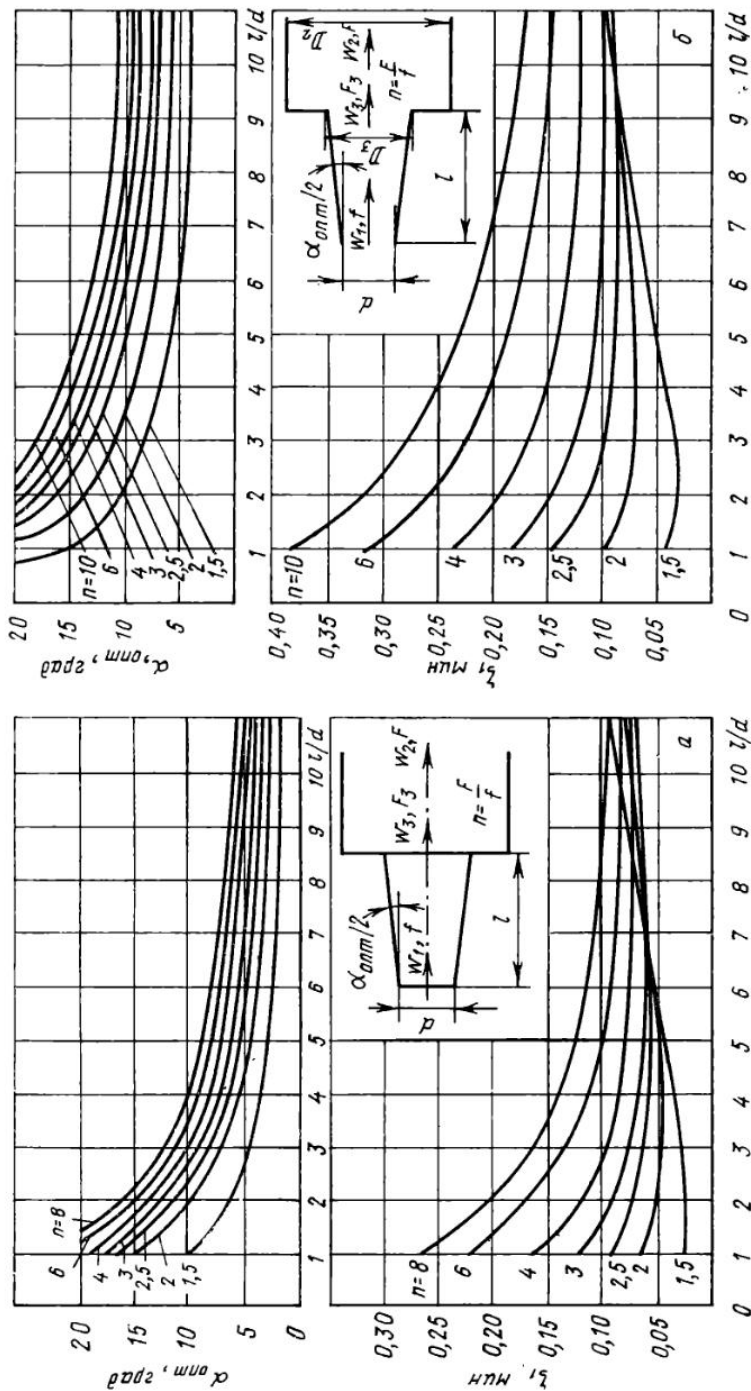


Рис. 99. Зависимость коэффициента минимального сопротивления ζ_{\min} и оптимального угла расширения $\beta_{\text{опт}}$ от относительной длины l/d :
 а — ступенчатого диффузора круглого сечения; б — плоского ступенчатого диффузора

к скорости в меньшем сечении w_1 ; его величина может быть также определена по формулам:

для сужения

$$\zeta_1 = 0,5 \left(1 - \frac{f}{F}\right)$$

и для расширения

$$\zeta = \left(1 - \frac{f}{F}\right)^2.$$

Коэффициент местного сопротивления для круглого диффузора в канале на выровненном потоке определяют по рис. 98.

При угле раствора диффузора $\alpha > 40^\circ$ коэффициент сопротивления рассчитывают, как в случае внезапного расширения (для $\alpha = 40^\circ$). Значения ζ отнесены к скорости в меньшем сечении f . Для прямоугольного сечения и двустороннего раскрытия диффузора размер d принимается по диагонали сечения (максимальный угол раскрытия). При наличии за диффузором оборудования, создающего сопротивление, большее потерь в диффузоре, во всех случаях принимать для диффузора $\zeta = 0$.

Наименьшими потерями по сравнению с прямолинейным и криволинейным диффузорами отличается ступенчатый диффузор. Значения оптимальных углов расширения ступенчатого диффузора и соответствующие им минимальные значения коэффициентов общего сопротивления ζ_{\min} для круглых и плоских диффузоров с различными отношениями площадей $n = f/F$ приведены на графиках рис. 99, а, б в зависимости от относительных длин l/d .

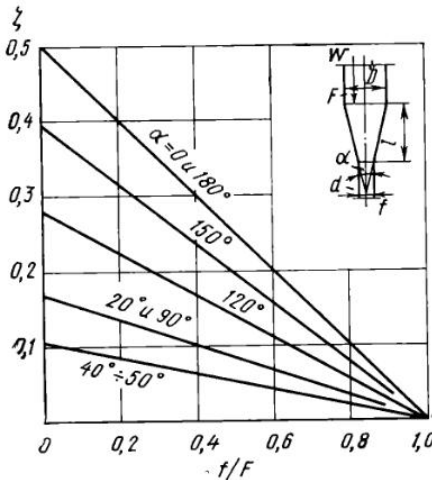


Рис. 100. Коэффициент местного сопротивления ζ конфузора

Для конфузора значение коэффициента местного сопротивления ζ может быть определено по формуле

$$\zeta = 0,5 \sin \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{f}{F}\right)$$

либо по рис. 100. Значения ζ отнесены к скорости в меньшем сечении f .

Коэффициент местного сопротивления для дросселирующих устройств приведен на рис. 101—105.

Для стержневых решеток, которые выполнены из удобообтекаемых, прямоугольных или круглых стержней, коэффициент местного сопротивления

может быть представлен в виде зависимости от коэффициента живого сечения $2\delta/b$:

$$\zeta_1 = \beta \left(\frac{b}{2\delta} - 1\right)^{4/3} = \beta \cdot K',$$

где δ — полуширина просвета между соседними стержнями решетки; b — расстояние между осями соседних стержней решетки; β — опытный коэффициент, зависящий от формы решетки.

Значения β и K' приведены на рис. 106.

Коэффициент β мало зависит от относительной ширины стержня s_1/b , где s_1 — ширина стержня. Для стержней, наклоненных под углом φ к потоку, коэффициент сопротивления определяют по формуле

$$\zeta_1 = \beta \left(\frac{b}{2\delta} - 1\right)^{4/3} \sin \varphi.$$

Рис. 101. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_2 диафрагмы или плоской решетки из перфорированного листа (а) или металлических полос (б) в трубе от отношения F_1/f (F_1 — живое сечение решетки)

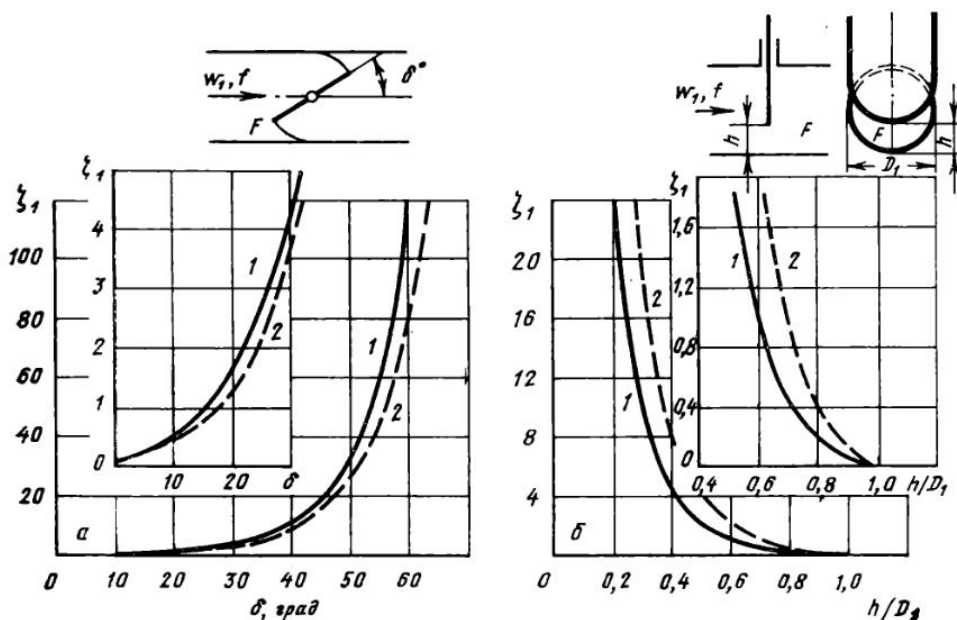
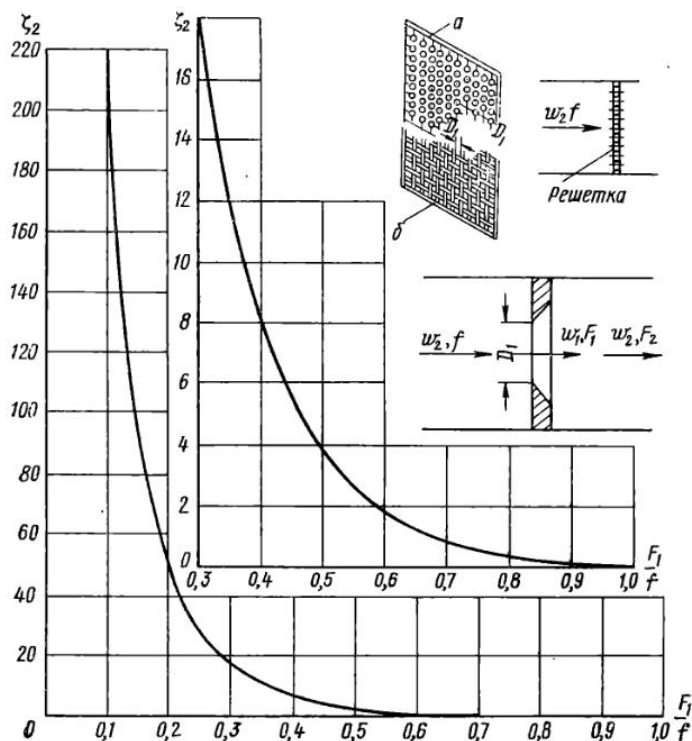


Рис. 102. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 дроссель-клапана в трубах круглого и прямоугольного сечения от угла открытия клапана δ , град (а) и от положения шибера h/D_2 (б):

1 — круглое сечение; 2 — прямоугольное сечение

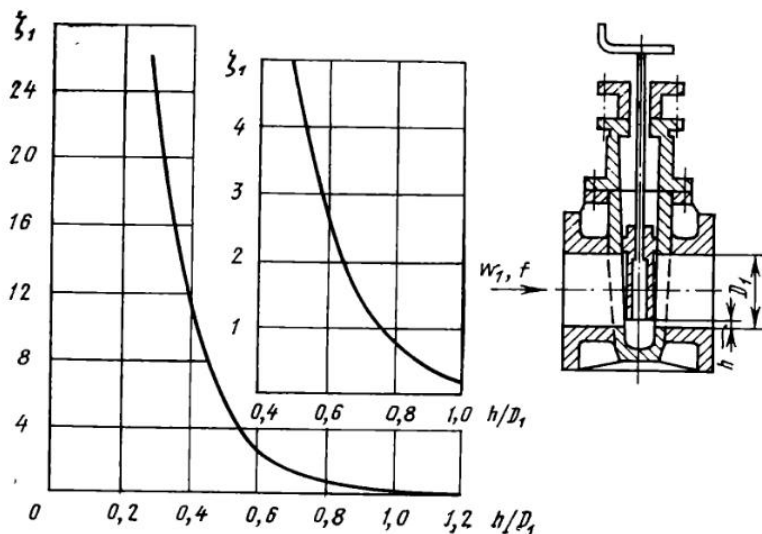


Рис. 103. Зависимость коэффициента сопротивления ζ параллельной задвижки в круглой трубе от степени открытия h/D_1

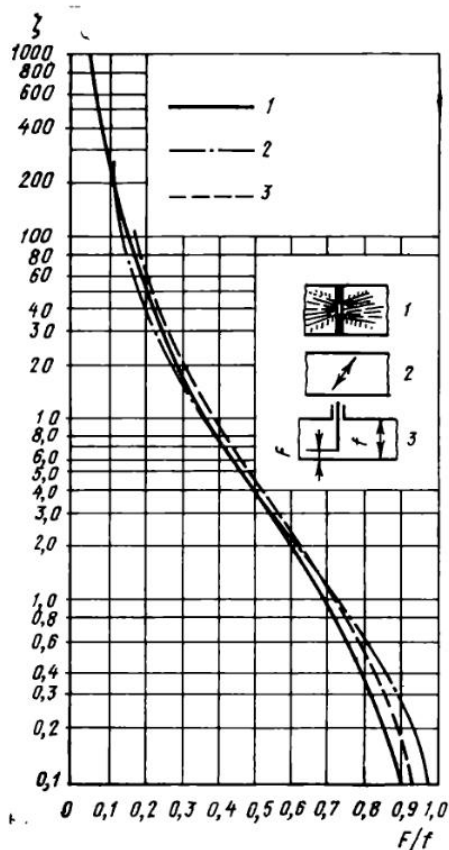


Рис. 104. Коэффициент местного сопротивления для дроселирующих устройств: 1 — диафрагма с острыми кромками; 2 — поворотный клапан; 3 — шибер (F/f — относительное живое сечение шибера)

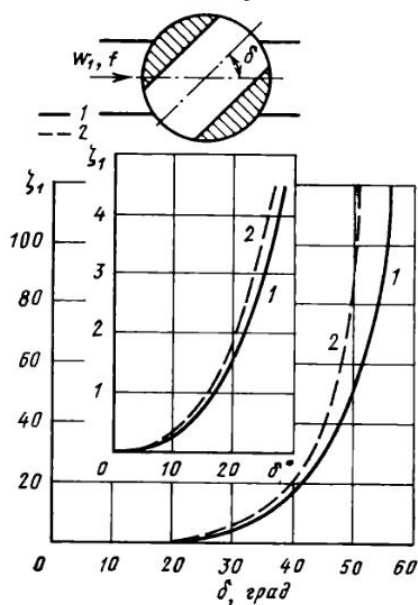


Рис. 105. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 пробкового крана в трубах круглого и прямоугольного сечений от угла открытия δ : 1 — круглое сечение; 2 — прямоугольное сечение

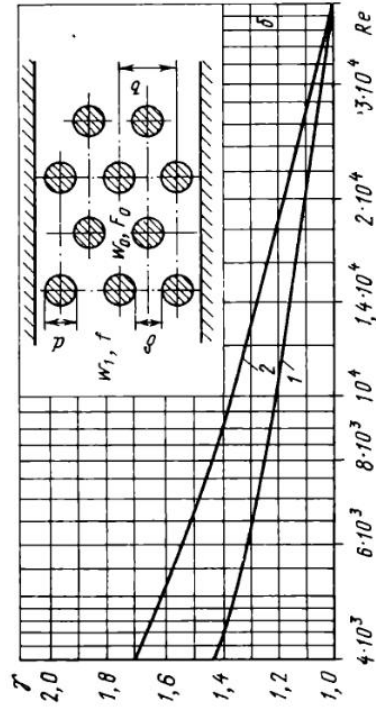
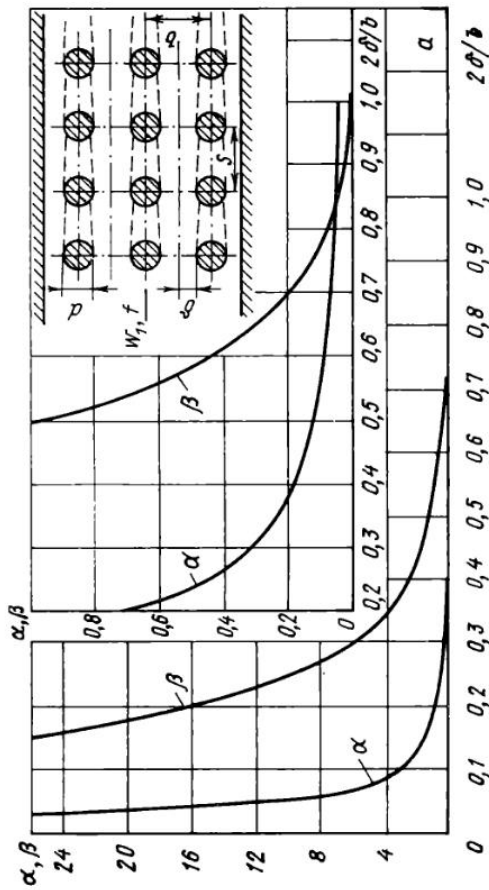


Рис. 107. Вспомогательные графики для определения коэффициента сопротивления пучка труб: а — коридорный пучок; б — шахматный пучок

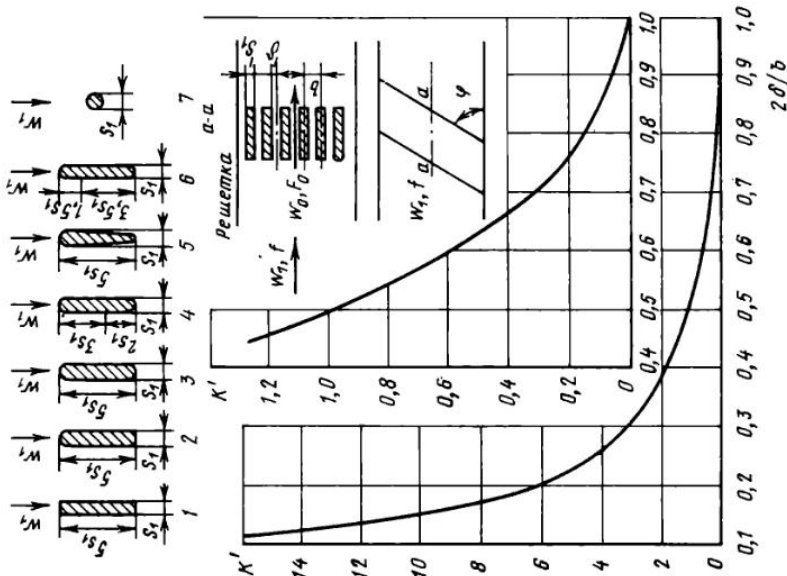


Рис. 106. Зависимость коэффициента K' от отношения $2\delta/b$ для стержневых решеток:

Коэффициент местного сопротивления пучка труб при значении критерия $Re \geq 4 \cdot 10^4$ находят по формулам:
коридорный пучок труб

$$\zeta_1 = n \frac{s}{b} \alpha + \beta;$$

шахматный пучок труб

$$\zeta_1 = 0,7 \div 0,8 \left(n \frac{s}{b} \alpha + \beta \right).$$

Здесь α и β — функции, зависящие от коэффициента живого сечения $2\delta/b$:

$$\alpha = 0,028 \left(\frac{b}{2\delta} \right)^2 \text{ и } \beta = \left(\frac{b}{2\delta} - 1 \right)^2.$$

Значения α и β приведены на рис. 107, а, б.

s — расстояние между осями рядов труб;

b — расстояние между осями труб в ряду;

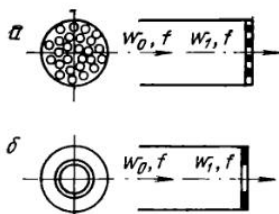
n — число межрядных участков вдоль канала.

При значении критерия $Re < 4 \cdot 10^4$ коэффициент местного сопротивления ζ'_1 находится из выражения $\zeta'_1 = \gamma \cdot \zeta_1$, где γ — поправочный коэффициент, определяемый по рис. 107.

3. Выход потока из канала

При свободном выходе из канала любого сечения коэффициент местного сопротивления $\zeta = 1$ и относится к скорости потока в канале.

При истечении из отверстия в неограниченное пространство — выход через шайбу или решетку на конце трубы — коэффициент сопротивления вычисляется по формуле



$$\zeta_0 = \left(1 + 0,707 \sqrt{1 - \frac{F}{f}} \right)^2 \left(\frac{f}{F} \right).$$

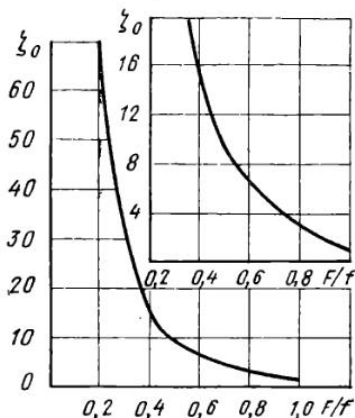


Рис. 108. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_0 истечению из отверстия в неограниченное пространство от отношения площадей F/f (F — живое сечение решетки или шайбы):
а — решетка; б — шайба

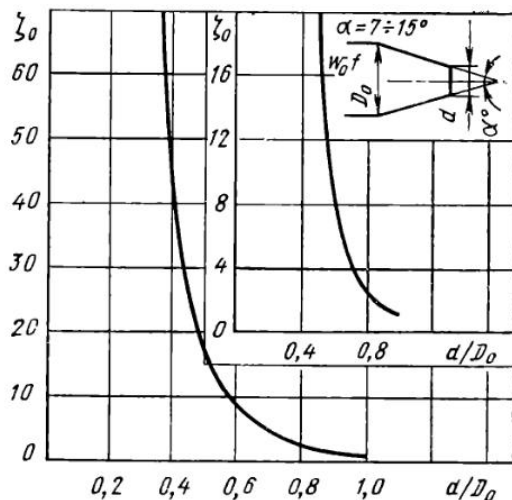


Рис. 109. Коэффициент сопротивления для плавно сужающейся насадки (сопла) с $\alpha = 7 \div 15^\circ$

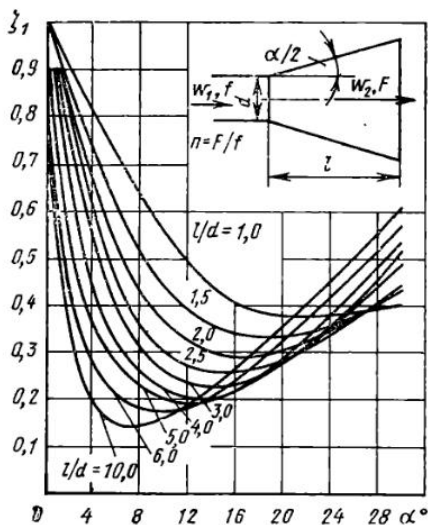


Рис. 110. Зависимость расчетного значения коэффициента полного сопротивления ζ_1 диффузора круглого сечения со свободным выходом потока из сети от угла расширения α при различных относительных длинах l/d

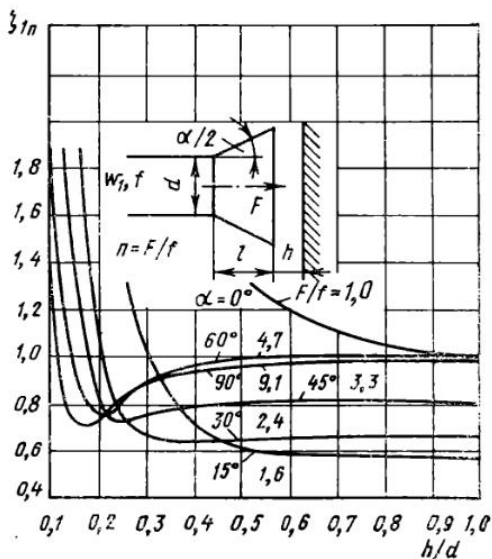


Рис. 111. Зависимость коэффициента полного сопротивления диффузора круглого сечения от относительного расстояния h/d до экрана при различных значениях угла расширения

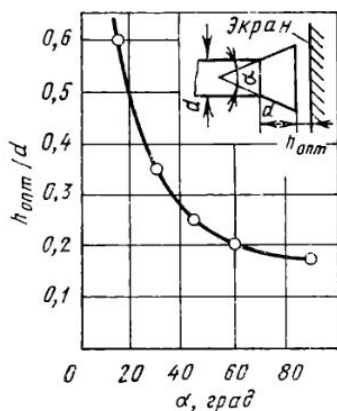


Рис. 112. Зависимость оптимального значения относительного расстояния h/d экрана до выходного отверстия от угла расширения α

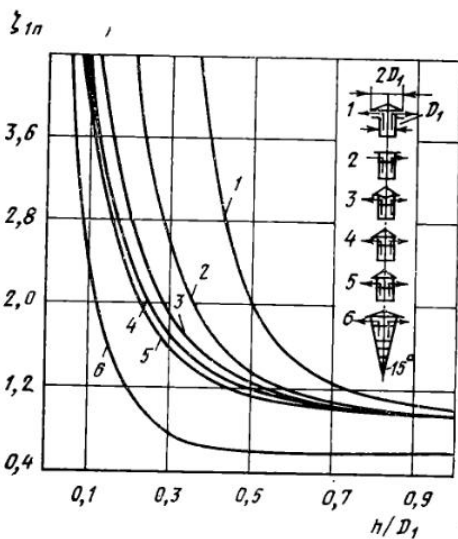


Рис. 113. Зависимость коэффициента сопротивления $\zeta_{1,2}$ круглых вытяжных шахт (выход из сети от относительного расстояния h/D_1 между зонтом и шахтой)

Зависимость ζ_0 от F/f дана на рис. 108. Выход потока из плавно сужающейся насадки определяют по формуле

$$\zeta_0 \approx 1,05 \left(\frac{D_0}{d} \right)^4,$$

графически представленной на рис. 109.

При установке на выходе из канала круглого диффузора коэффициент полного сопротивления может быть определен по рис. 110

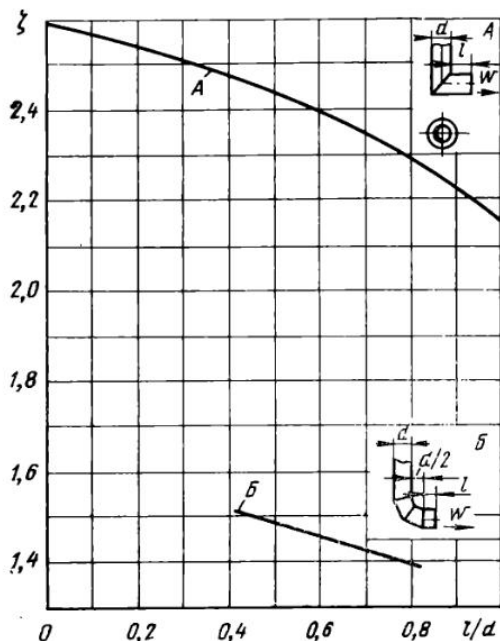


Рис. 114. Коэффициент местного сопротивления при выходе через насадку-колесо

в зависимости от угла раскрытия диффузора α и его относительной длины l/d . При выходе потока через диффузор на экран величина коэффициента местного сопротивления приведена на рис. 111. Как видно на графике, установка экрана оказывает двойное влияние на величину ζ_{1n} . На рис. 112 приведено оптимальное значение относительного расстояния диффузора от экрана при различных углах раскрытия диффузора α . Коэффициент сопротивления выхода из канала под колпак — вытяжные шахты — представлен на рис. 113, а выход через насадку-колесо приведен на рис. 114, в величину ζ включена потеря выхода.

При боковом выходе через последнее отверстие в канале значение коэффициента сопротивления, отнесенного к скорости выхода, составляет $\zeta = 2,5$.

4. Вход потока в канал

Зависимость коэффициента сопротивления прямого входа от относительного расстояния входного отверстия до стенки, в которую заделана труба, дана на рис. 115.

Для случая заделки входа в канал заподлицо со стенкой $\zeta_1 = 0,5$.

Коэффициенты сопротивления заделанных и незаделанных в стенку коллекторов, очерченных по дуге окружности, определяют по рис. 116.

Для коллекторов с прямыми образующими (конические коллекторы) коэффициенты сопротивления вычисляются по рис. 117 и 118.

Для промышленных установок целесообразно использовать конические коллекторы с относительной длиной l/d не более 0,2—0,3 и с углом сужения $\phi = 40—80^\circ$.

В том случае, когда вход в канал сечения F_1 происходит не из неограниченного пространства, а из канала большего, но соизмеримого се-

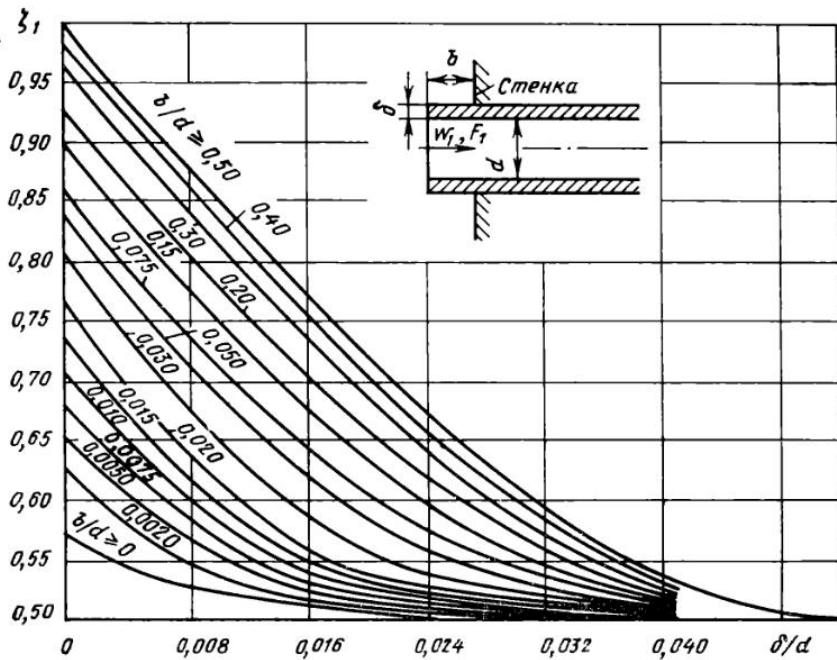


Рис. 115. Вспомогательные кривые для определения коэффициентов сопротивления прямых входов

чения F_0 , коэффициент сопротивления входа, отнесенный, как обычно, к меньшему сечению F , определяют по формуле

$$\zeta = \zeta_1 \left(1 - \frac{F_1}{F_0} \right),$$

где ζ — принимают в зависимости от формы входа по соответствующему графику на рис. 118—122.

Влияние относительного расстояния экрана и относительной толщины стенки канала на коэффициент сопротивления при входе представлено на рис. 119.

Для любой формы входа с экраном общий коэффициент сопротивления может быть представлен как сумма двух сопротивлений

$$\zeta_{1 \text{ экр}} = \zeta_1 + \Delta \zeta_1,$$

где ζ_1 — коэффициент сопротивления входа любой формы без экрана (см. рис. 115—118);

$\Delta \zeta_1 = \frac{\sigma}{n^2}$ — коэффициент той части сопротивления, которая вызывается присутствием экрана;

σ — коэффициент, учитывающий влияние экрана и зависящий от относительного расстояния h/d ;

$n = \frac{F_{\text{вх}}}{F_1}$ — отношение площади входного отверстия к площади трубы после входа.

Значения σ приведены на рис. 120.

Коэффициент сопротивления входа в канал из-под колпака — приточные шахты — приведен на рис. 121.

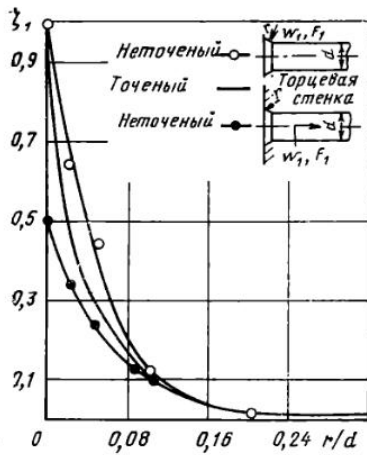


Рис. 116. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 коллекторов, профилированных по дуге круга, от относительного радиуса закругления r/d

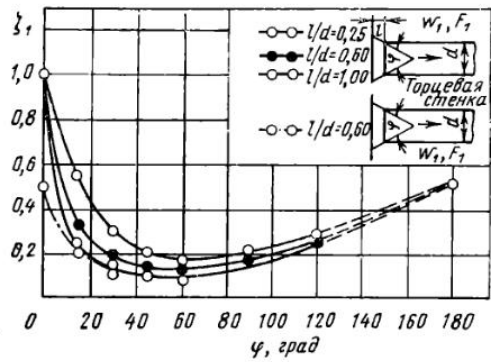


Рис. 117. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 конических коллекторов от угла сужения φ при различных l/d

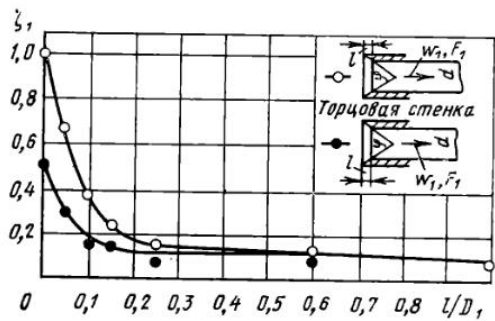


Рис. 118. Зависимость коэффициента сопротивления конических коллекторов от относительной длины l/d при $\varphi=60^\circ$

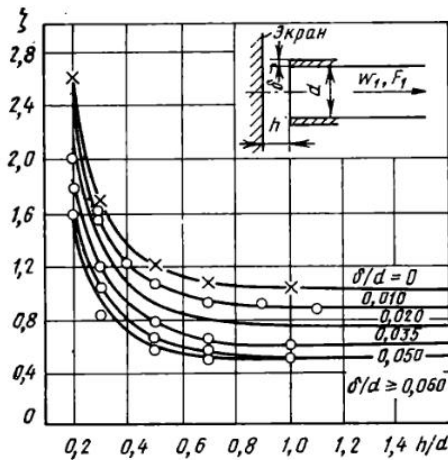


Рис. 119. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 прямого входа от относительного расстояния h/d до экрана при различной относительной толщине δ/d

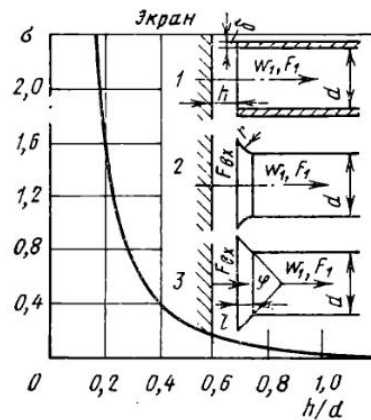


Рис. 120. Зависимость коэффициента σ от относительного расстояния h/d

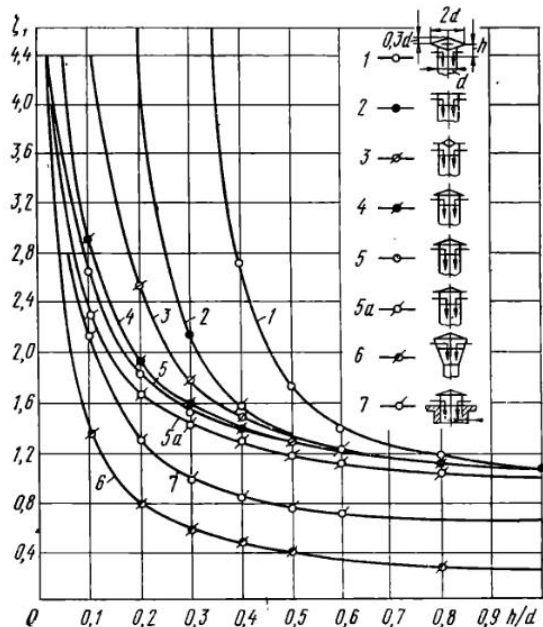


Рис. 121. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 приточных шахт от относительного расстояния h/d до зонта при δ/d :
 $5a - 0,01$; $7 - 0,025$. Все остальные — при $\delta/d = 0$

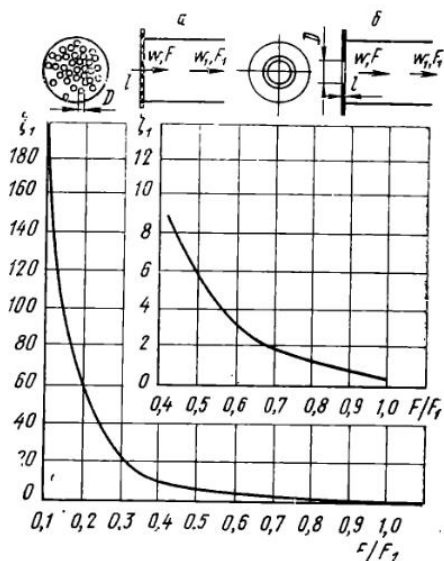


Рис. 122. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_1 входа в прямую трубу через плоскую решетку (а) или шайбу (б) от относительного живого сечения F/F_1

При прямом входе в канал и наличии на входе плоской решетки или дроссельной шайбы с острыми краями коэффициент сопротивления определяется по формуле


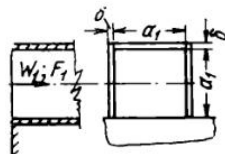
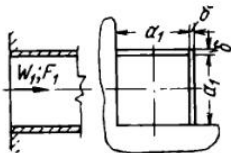
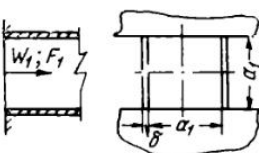
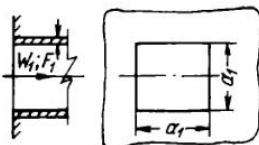
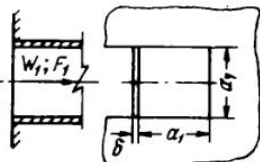
$$\zeta_1 = \left(1,7 - \frac{F}{F_1}\right)^2 \left(\frac{F_1}{F}\right)^2.$$

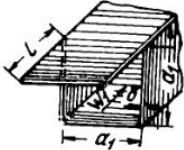
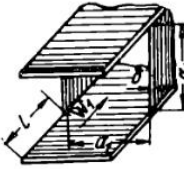
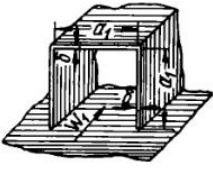
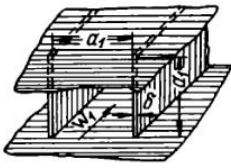
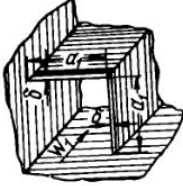
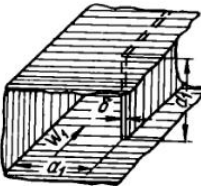
Зависимость ζ_1 от относительного живого сечения приведена на рис. 122.

В табл. IX-3 приведен ряд примеров, встречающихся на практике, для различных образом произведенной заделки в стенку входного отверстия и расположения входного участка трубы относительно стенок в зависимости от тех или иных конструктивных или строительных условий.

Таблица IX-3

Коэффициенты местного сопротивления различных случаев входа в каналы

Наименование входа	Схема	Коэффициент сопротивления ζ_1
Прямой вход (без стенок)		0,6
Вход с торцевой стенкой, установленной с одной стороны трубы (канала)		0,58
Вход с торцевыми стенками, установленными с двух смежных сторон трубы (канала)		0,55
Вход с торцевыми стенками, установленными с двух противоположных сторон трубы (канала)		0,55
Вход с торцевыми стенками, установленными с трех сторон трубы (канала)		0,52
Вход с торцевыми стенками, установленными с четырех сторон трубы (канала)		0,50

Наименование входа	Схема	Коэффициент сопротивления ζ_1
Вход с козырьком с одной стороны трубы (канала) при $\frac{l}{a_1} = 0,5$		0,67
Вход с козырьком с двух сторон трубы (канала) при $\frac{l}{a_1} = 0,5$		0,82
Вход в трубу (канал), расположенную на стенке		0,63
Вход в трубу (канал), заделанную между двумя стенками		0,71
Вход в трубу (канал), расположенную в двупланном углу (между двумя стенками)		0,77
Вход в трубу (канал), зажатую между тремя стенками		0,92

При боковом входе в трубу (в прорезь) для первого отверстия коэффициент местного сопротивления, отнесенный к скорости в отверстии, равен $\zeta = 0,6$.

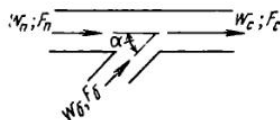
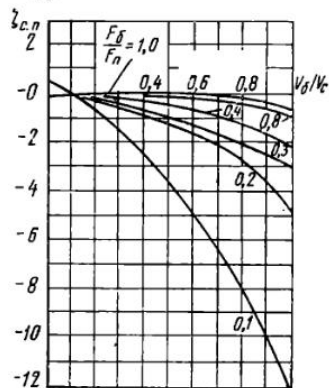
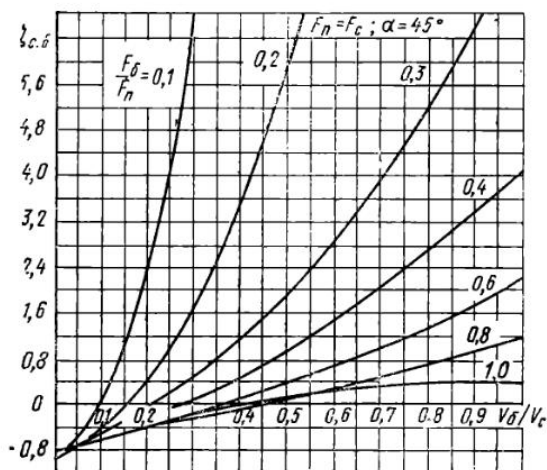
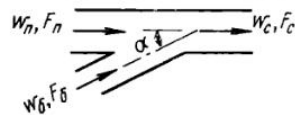
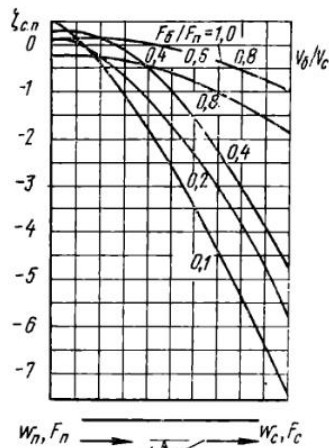
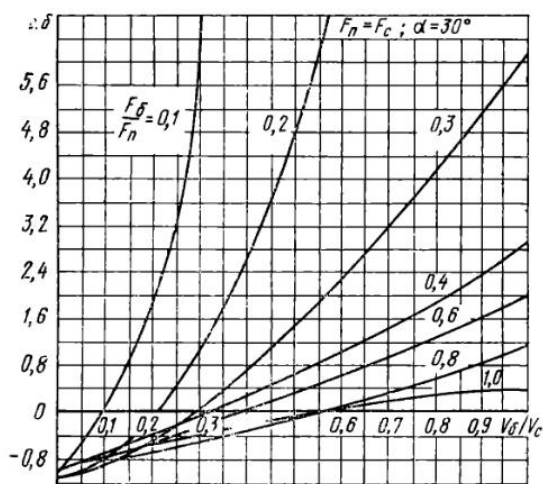
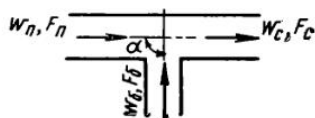
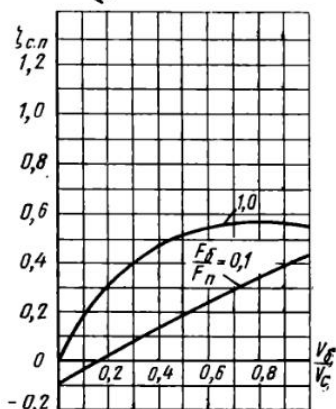
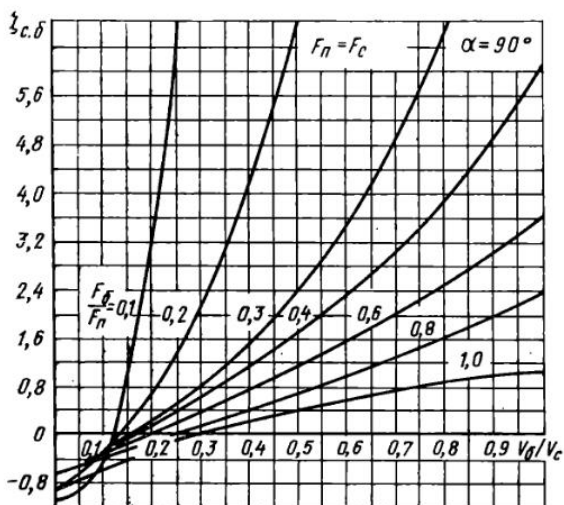
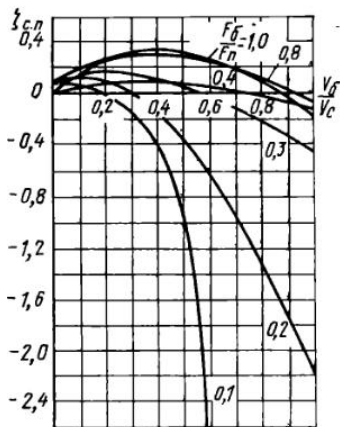
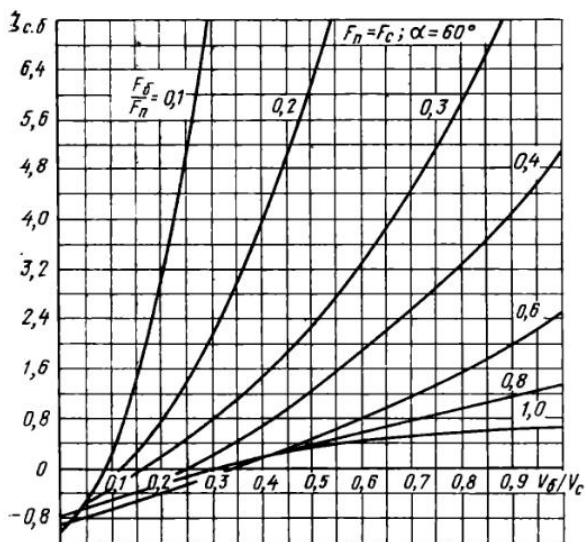


Рис. 123. Коэффициенты сопротивления собирающих тройников ($F_б + F_п > F_c$; $F_п = F_c$) при $\alpha - 30$; $\beta - 45$;

5. Слияние и разделение потоков

Коэффициенты сопротивления тройников даются в зависимости от отношения площадей бокового ответвления и проходного канала $F_б/F_п$ и отношения расходов жидкости по боковому ответвлению и суммарного в сборном канале $V_б/V_c$; коэффициент сопротивления бокового канала

$$\zeta_{б} = \frac{h_{\text{пот. б}}}{\frac{\rho \omega_б^2}{2g}} = \zeta_{c. б} \left(\frac{V_c}{V_б} \cdot \frac{F_б}{F_c} \right)^2 = \zeta_{c. б} \left(\frac{w_c}{\omega_б} \right)^2;$$



различных значениях α , град:

1 — 60; 2 — 90

для проходного канала

$$\zeta_{п} = \frac{h_{\text{пот. п}}}{\frac{\rho w_{п}^2}{2g}} = \zeta_{с. п} \frac{1}{\left(1 - \frac{V_б}{V_с}\right)^2}$$

Значения коэффициентов сопротивления

$$\zeta_{с. б} = f\left(\frac{V_б}{V_с}\right) \quad \text{и} \quad \zeta_{с. п} = f\left(\frac{V_б}{V_с}\right)$$

для случая слияния потоков даны на рис. 123, а—г при $F_{п} = F_с$ и различных углах α и на рис. 124, а для встречного вхождения бокового потока.

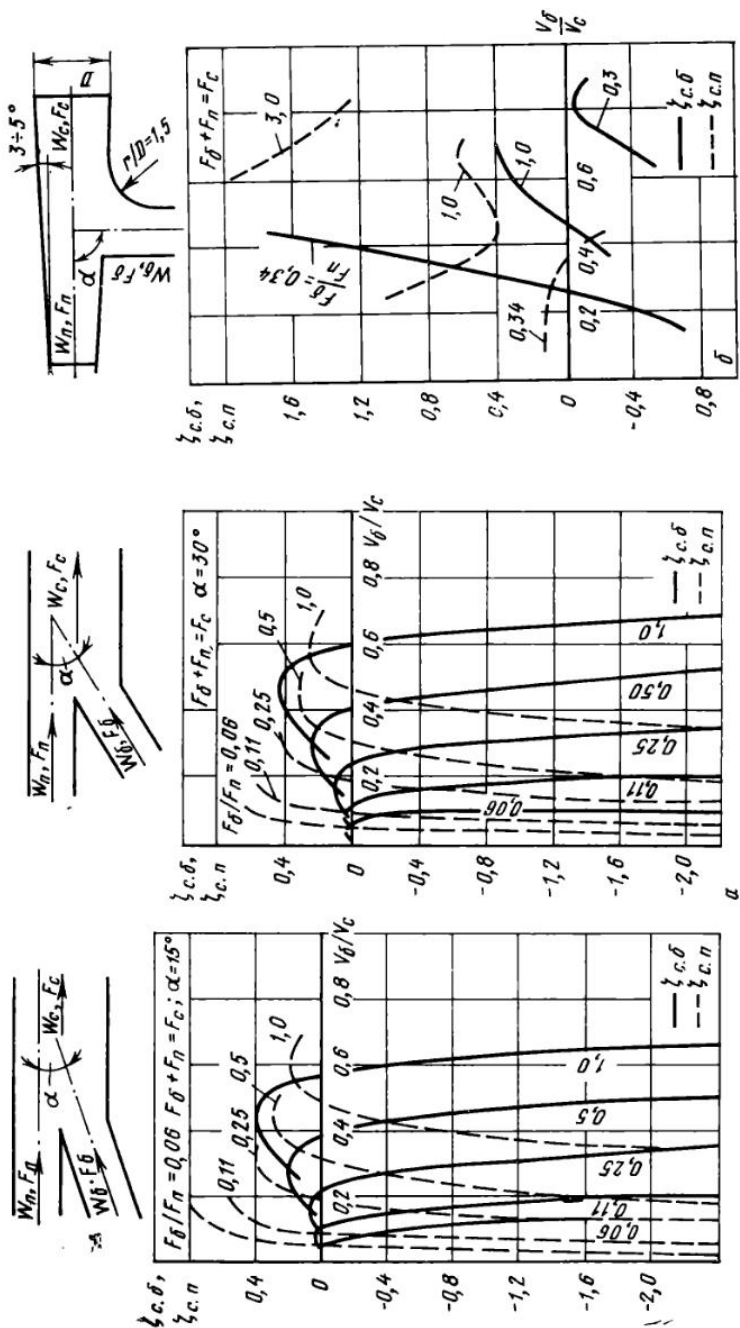
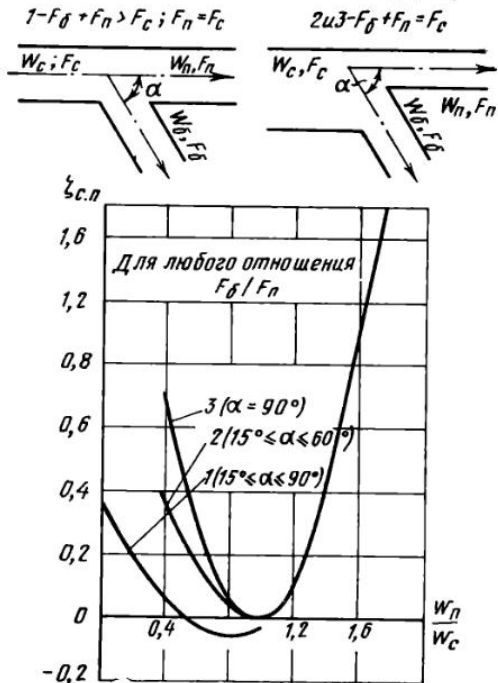


Рис. 124. Коэффициент сопротивления собирающих тройников ($F_\delta + F_n = F_c$):
 а — с цилиндрическим проходом; б — с плавным отвлечением при $\alpha = 90^\circ$

Рис. 125. Коэффициент сопротивления тройников любого тела с цилиндрическим проходом



При соотношении площадей каналов $F_6 + F_{\text{п}} = F_c$ коэффициенты сопротивления определяются из выражений

$$\zeta_6 = \zeta_{c.6} \frac{1}{\left(\frac{V_6}{V_c} \cdot \frac{F_c}{F_6}\right)^2} \quad \text{и} \quad \zeta_{\text{п}} = \zeta_{c.\text{п}} \frac{1}{\left(1 - \frac{V_6}{V_c}\right)^2 \left(\frac{F_c}{F_{\text{п}}}\right)^2}.$$

Значения $\zeta_{c.6}$ и $\zeta_{c.\text{п}}$ приведены на графиках рис. 124, а, б.

Для случая прохождения канала следует пользоваться рис. 125. При разделении потока в тройнике коэффициент сопротивления ζ_6 определяется из соотношения

$$\zeta_6 = \frac{\zeta_{c.6}}{\left(\frac{V_6}{V_c} \cdot \frac{F_c}{F_6}\right)^2}.$$

Значения $\zeta_{c.6} = f\left(\frac{V_6}{V_c}\right)$ приведены на рис. 126.

Для разделения потока с соотношением площадей $F_6 + F_{\text{п}} = F_c$ и коническим проходом значения $\zeta_{c.6}$ и $\zeta_{c.\text{п}}$ приведены на рис. 127 для различных углов α .

Закругление кромок ответвлений и незначительное расширение входных сечений заметно уменьшают коэффициенты сопротивления тройников.

При расчете сопротивления симметричных тройников их условно разделяют на два самостоятельные поворота, причем сечение общего канала принимают разделенным продольной перегородкой пропорционально расходам через каждый из рукавов. Сопротивление тройника по каждому из потоков рассчитывают, как для соответствующего резкого поворота.

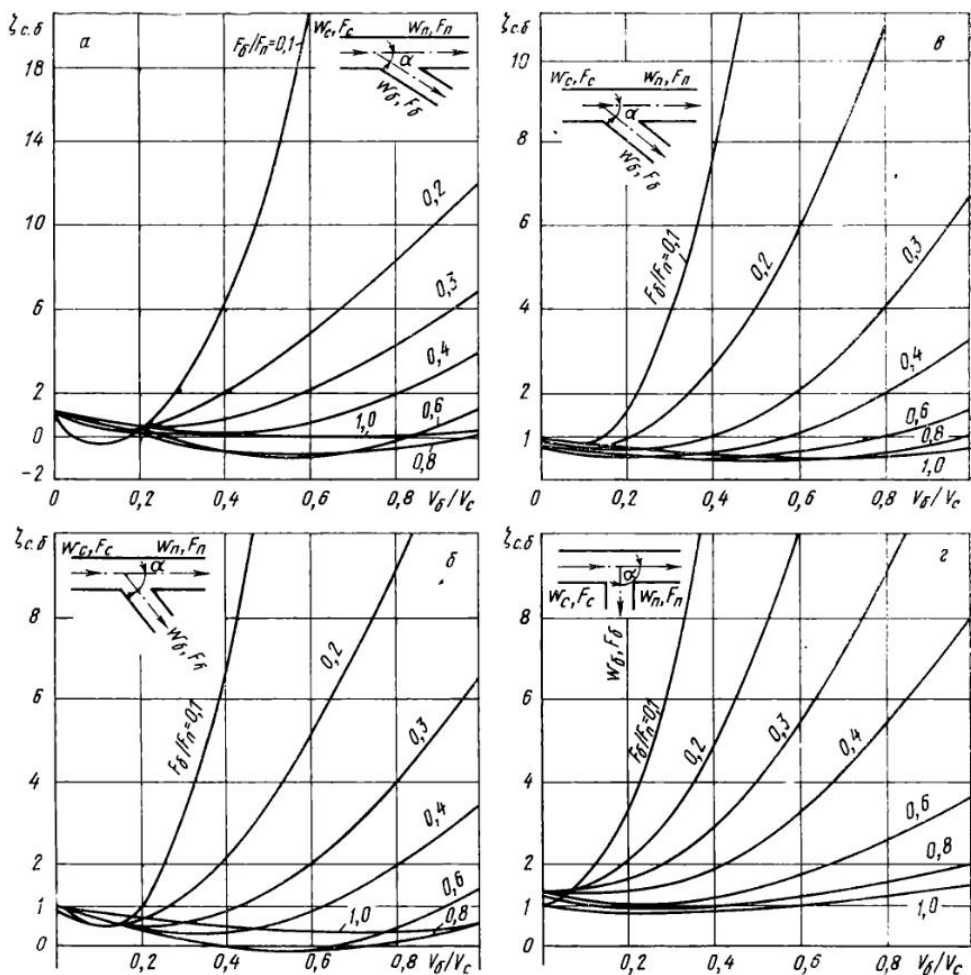


Рис. 126. Коэффициент сопротивления разходящих тройников при $F_{\Pi} = F_c$ и различных значениях α , град:
 а — 30; б — 45; в — 60; г — 90

6. Сыпучие материалы

В настоящее время отсутствуют данные, позволяющие выполнить универсальный расчет сопротивления слоя сыпучих материалов. Имеющиеся экспериментальные формулы пригодны для условий, близких к проведенным опытам.

Хейлигенштедт дает формулу для расчета потери давления в слое материалов $h_{\text{пот}}$ в мм вод. ст. на 1 м высоты слоя:

$$h_{\text{пот}} = n \rho \omega^{1,9},$$

где ρ — плотность воздуха или газа и ω — его скорость;

n — константа, для зерен размером 60 ± 10 мм $n=11$; 45 ± 5 мм $n=14 \div 18$; 35 ± 5 мм $n=28$; 25 ± 5 мм $n=55$.

В. И. Боршанский рекомендует для слоя шаров диаметром d , засыпанных произвольно и имеющих порозность (долю пустоты в объеме

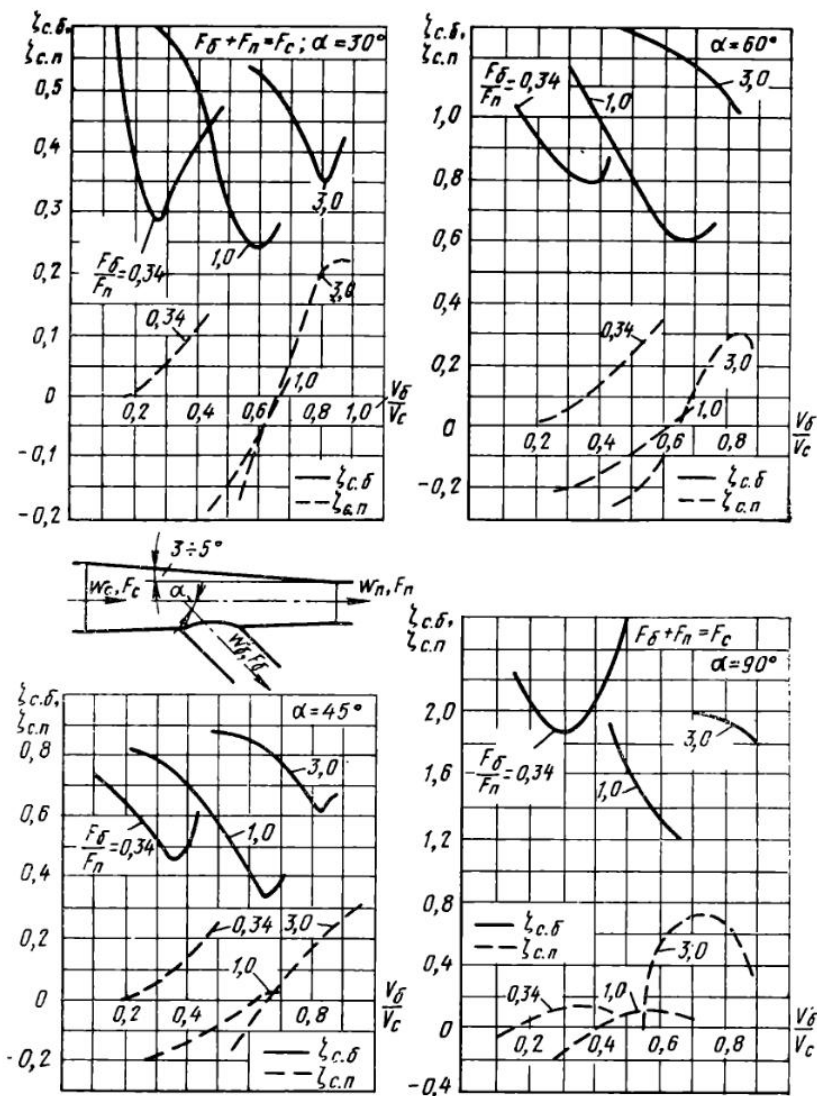


Рис. 127. Коэффициент сопротивления раздающих тройников с коническим проходом $F_\delta + F_n = F_c$ для различных углов α

засыпки), близкую к 0,4 (см. данные на с. 242), при числах $Re_{сл} = \omega d/\nu = 1 \div 5000$ следующую приближенную формулу:

$$\zeta_{сл} = 20 + \frac{7000}{Re_{сл}}$$

Н. Н. Жаворонков на основании своих исследований дает следующую формулу для сопротивления слоя кусковых материалов:

$$h_{пот} = \frac{7,6 \rho \omega^{0,8} \nu^{0,2} H}{g d_{гидр} f^{1,8}} \text{ мм вод. ст.,}$$

где H — высота слоя;

ω — скорость газа, отнесенная к полному сечению шахты, м/с;

$d_{гидр}$ — гидравлический диаметр канала, м;

$$d_{гидр} = \frac{2}{3} d_{экр} \frac{f}{1-f}$$

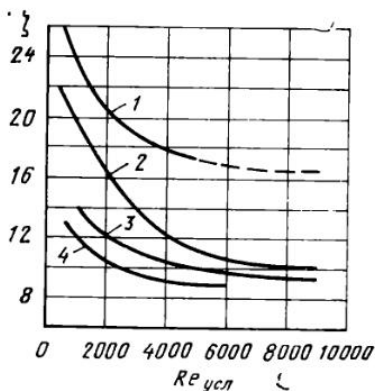


Рис. 128. Коэффициент сопротивления слоя кусковых материалов в зависимости от $Re_{\text{усл}}$:

1 — агломерат — остроугольные куски ($d_{\text{ср}} = 12-82$ мм), насыпная масса $\rho = 1140-1470$ кг/м³; 2 — известковая руда ($d_{\text{ср}} = 14-100$ мм), $\rho = 1380-1620$ кг/м³; 3 — кокс ($d_{\text{ср}} = 1-100$ мм), $\rho = 513-835$ кг/м³; 4 — агломерат из вращающейся печи — окатанные куски ($d_{\text{ср}} = 14-52$ мм), $\rho = 1475-1900$ кг/м³

Здесь f — порозность, т. е. доля пустоты в объеме засыпки.

За последнее время широкое применение получило выражение, аналогичное формуле потери напора на трение:

$$h_{\text{пот}} = \xi \frac{\rho \omega^3}{2g} \cdot \frac{H}{d_{\text{экв}}} \text{ мм вод. ст.},$$

где ξ — коэффициент сопротивления, определяемый по рис. 128;

ω — условная скорость движения, отнесенная к полному сечению печи, м/с;

$d_{\text{экв}}$ — средневзвешенный размер куска.

Относительная пористость при различной укладке шаров

Укладка	Пористость, %
Шары одного размера:	
наиболее рыхлая укладка (кубическая)	48,6
наиболее плотная укладка (ромбодекаэдр)	25,9
Шары двух размеров (1—0,732)	27,1
Шары трех размеров (1—0,732—0,268)	24,0
Шары четырех размеров (1—0,732—0,268—0,178)	17,0
Шары двух размеров (1—0,414)	20,6
Шары трех размеров (1—0,414—0,225)	19,0
Шары четырех размеров (1—0,414—0,225—0,177)	15,8

7. Течение газо-жидкостной смеси

Падение давления при течении в каналах паро-жидкостных и газо-жидкостных смесей $\left(\frac{\omega'_0 d}{\nu'} > 2000\right)$ рассчитывают по приведенным выше формулам с введением для $\zeta_{\text{тр}}$ и ξ поправочного множителя ε :

$$\varepsilon = 1 + \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right) \frac{\omega''_0}{\omega'_0 + \frac{\rho''}{\rho'} \omega''_0},$$

где ω'_0 — приведенная скорость жидкости, т. е. объемный расход жидкости, отнесенный к полной площади поперечного сечения канала;

ω''_0 — то же, для газовой (паровой) компоненты смеси.

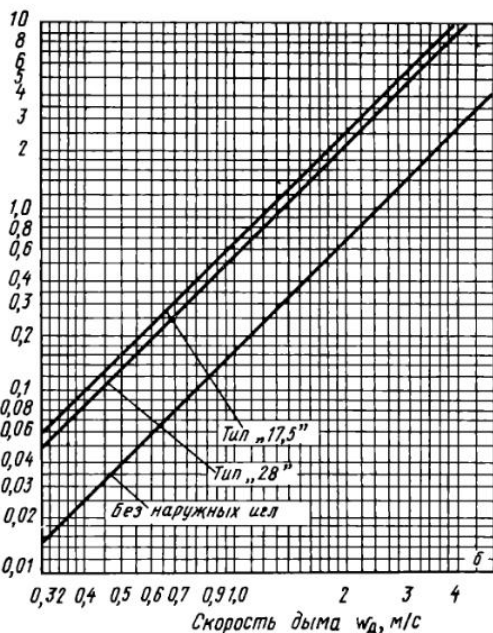
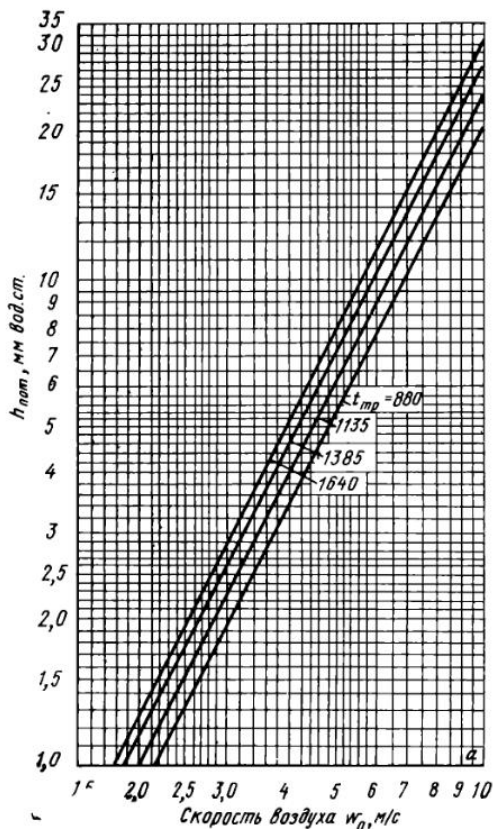
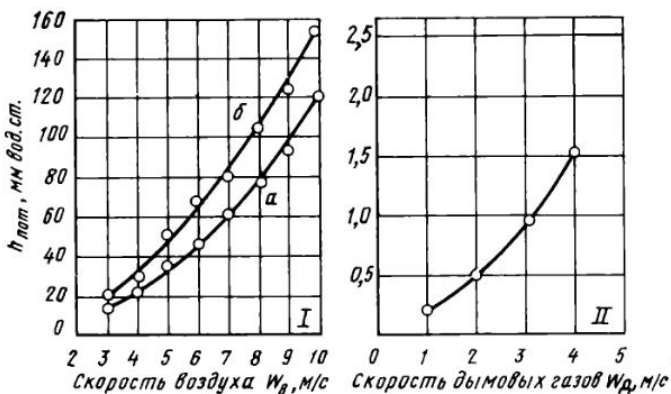


Рис. 129. Аэродинамическое сопротивление игольчатых труб на пути:
 а — воздуха (внутри); б — дымовых газов (снаружи)

Рис. 130. Аэродинамическое сопротивление рекуператора типа РИМ на воздушном (I) или дымовом (II) пути при температуре воздуха, °С: а — 30; б — 250 (на выходе из рекуператора)



Индексы «штрих» и «два штриха» относятся соответственно к характеристикам жидкой и газовой компонент потока.

8. Некоторые частные случаи

Потери напора при прохождении газов через элемент рекуператора — чугунную игольчатую трубу с наружными и внутренними (или только внутренними) иглами обтекаемой формы — представлены на рис. 129, а, б.

Для малых игольчатых рекуператоров реконструкции Теплопроекта (РИМ) потери напора представлены на рис. 130.

Коэффициент сопротивления на 1 м кладки регенеративной насадки, выполненной с чередующимися рядами и сквозными вертикальными каналами, определяют по формуле

$$\zeta = 1,14/\sqrt[4]{d_{\text{экв}}},$$

а для шахматного расположения

$$\zeta = 1,57/\sqrt[4]{d_{\text{экв}}},$$

где $d_{\text{экв}}$ — эквивалентный диаметр канала насадки,

$$d_{\text{экв}} = \sqrt{4F/\pi}.$$

Переводные устройства типа «Симплекс» имеют коэффициент сопротивления $\zeta=4$, типа «Фортер» $\zeta=2,5$. При установке внутри клапана листов в виде направляющих лопаток коэффициент сопротивления снижается. В зависимости от высоты подъема h тарельчатого клапана коэффициент сопротивления меняется следующим образом (d — диаметр канала):

h/d	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
ζ	9	4,5	3	2,1	1,7	1,6	1,5

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАВЛЕНИЙ И РАЗРЕЖЕНИЙ

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАГНЕТАНИЯ ГАЗОВ

Согласно ГОСТ 5976—55, центробежные вентиляторы разделяются на три группы в зависимости от создаваемого ими полного давления — статического плюс динамическое: а) вентиляторы низкого давления (с разностью полных давлений до 1000 Н/м², или 100 мм вод. ст.); б) вентиляторы среднего давления (до 3000 Н/м², или 300 мм вод. ст.); в) вентиляторы высокого давления (до 15000 Н/м², или 1500 мм вод. ст.).

Осевые вентиляторы применяются в системах при суммарных потерях давления в сети до 350 Н/м² (35 мм вод. ст.).

Конструктивное исполнение центробежных вентиляторов и положение кожухов правого (по часовой стрелке, если смотреть со стороны привода) и левого вращения показано на рис. 131. Вентиляторы одностороннего всасывания должны соответствовать схемам исполнения 1—6, а двустороннего всасывания — схеме 7.

Центробежные вентиляторы подбирают по графикам или таблицам вентиляторов.

Тип вентилятора, согласно ГОСТ 5976—55, характеризуется быстротходностью или удельным числом оборотов n_y . Быстротходность n_y вентилятора представляет собой величину, устанавливающую связь между значениями расхода воздуха v м³/ч, полным давлением H мм вод. ст. при стандартных атмосферных условиях (при $p=760$ мм рт. ст., $t=20^\circ\text{C}$ и относительной влажности 50%) и числом оборотов n в 1 мин:

$$n_y = \frac{n v^{1/2}}{H^{3/4}} = \frac{n \sqrt{v}}{\sqrt{H} \sqrt{H}}.$$

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЯГИ

Дымовая труба предназначена для удаления продуктов сгорания из рабочего пространства печи, соединенного с ней системой боронов. Геометрический напор $H_{\text{геом.тр}}$ (разрежение) столба горячего газа внутри трубы, расположенной в атмосфере более холодного воздуха, должен покрыть потери напора при прохождении дымовых газов по системе боронов $\Sigma h_{\text{пот}}$, потери на трение в самой трубе $h_{\text{тр}}$ и потери на выхлоп в устье трубы $h_{\text{вых}}$.

Потери давления $\Sigma h_{\text{пот}}$ в процессе работы печи могут увеличиваться вследствие заноса дымовых каналов пылью, увеличения подсоса воздуха через неплотности либо последующей форсированной работы печи. Поэтому величину потерь напора при расчете необходимо принимать с некоторым запасом (больше на 30—50%).

В СССР принят закон об охране окружающей среды. Во исполнение этого закона, заботясь о чистоте воздуха в районе промышленных предприятий и расположенных рядом с ними жилых поселков, необходимо продукты сгорания отводить как можно выше от поверхности земли. Это позволит уменьшить концентрацию вредных веществ в воздушной атмосфере. В связи с этим, очевидно, необходимо рекомендовать запас тяги 50—100%, т. е. принимать коэффициент запаса $K_3=2$. Кроме того, для каждого типа промышленных установок, в зависимости от ко-

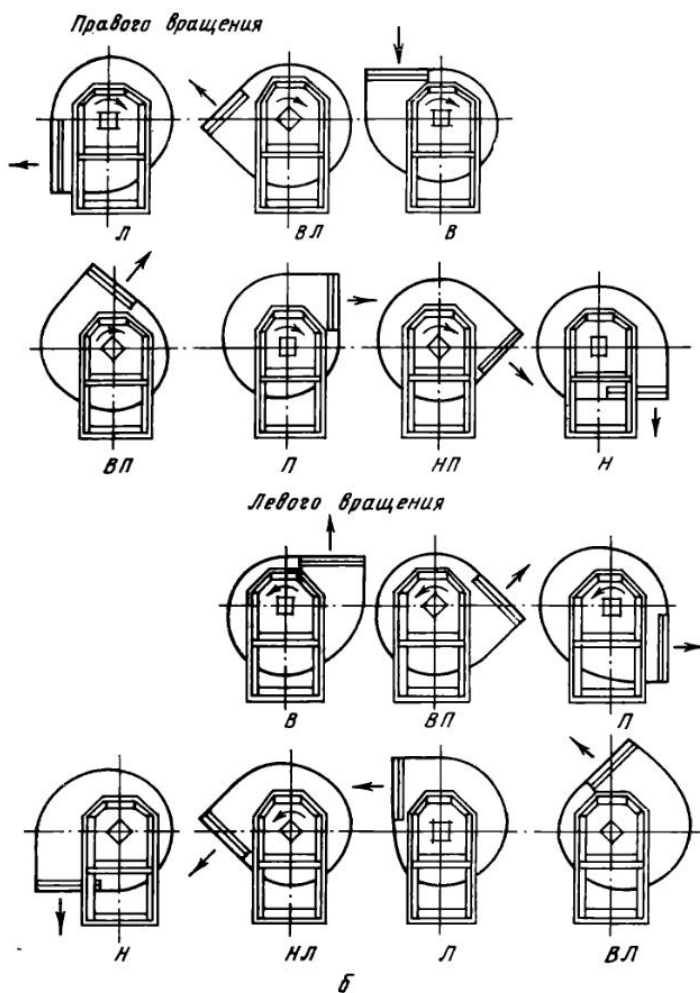
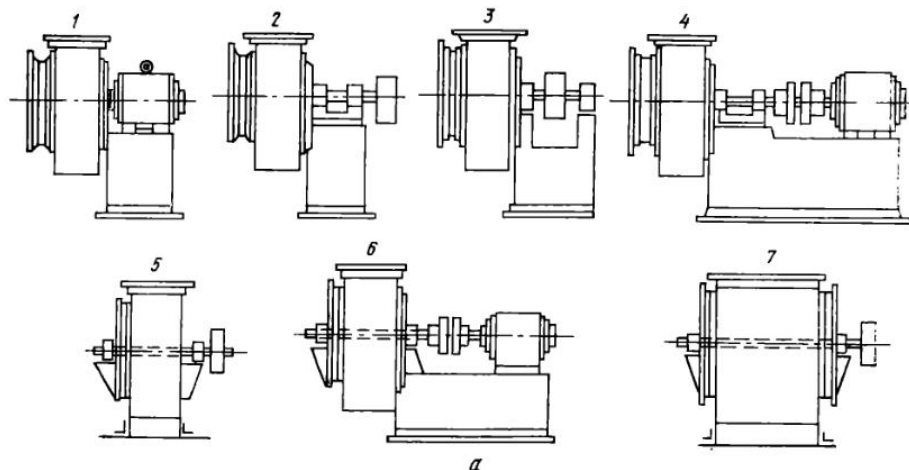


Рис. 131. Принципиальные схемы конструктивного исполнения центробежных вентиляторов по ГОСТ 5976—55:

а — схемы конструктивного оформления вентиляторов; 1 — установка с колесом, посаженным непосредственно на вал электродвигателя; 2 — установка с вынесенным шкивом или муфтой; 3 — установка с плоским шкивом между двумя подшипниками; 4 — установка с вынесенной муфтой и с электродвигателем на общей стойке; 5 — установка с колесом между двумя подшипниками и выносным шкивом; 6 — установка с колесом между двумя подшипниками, муфтой и электродвигателем на общей стойке; 7 — установка двустороннего вентилятора с колесом между двумя подшипниками и с выносным шкивом; б — схемы положения кожухов вентиляторов: Л — левое; П — правое; ВЛ — верхнее левое; ВП — верхнее правое; В — верхнее, Н — нижнее; НП — нижнее правое; НЛ — нижнее левое.

личества вредных примесей в продуктах сгорания, должны быть установлены размеры минимальной высоты дымовой трубы по санитарным условиям.

Если суммарные потери давления $\Sigma h_{\text{пот}}$ и барометрическое давление измеряют в Н/м², то формула для высоты дымовой трубы имеет вид:

$$H = \frac{K_3 \Sigma h_{\text{пот}} + \rho_0^r \left[\frac{\omega_{02}^2}{2} (1 + \beta t_2^r) - \frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta t_1^r) \right]}{g \left(\frac{\rho_0^b}{1 + \beta t_b} - \frac{\rho_0^r}{1 + \beta t_r} \right) \frac{B}{101,32} - \mu \frac{\rho_0^r}{2 d_{\text{ср}}} \left[\frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta t_1^r) + \frac{\omega_{02}^2}{2} (1 + \beta t_2^r) \right]} \text{ м.}$$

Если величины давлений измеряют в миллиметрах водяного столба, то уравнение для определения высоты дымовой трубы имеет вид:

$$H = \frac{K_3 \Sigma h_{\text{пот}} + \frac{\rho_0}{2g} [\omega_{02}^2 (1 + \beta t_2^r) - \omega_{01}^2 (1 + \beta t_1^r)]}{\left(\frac{\rho_0^b}{1 + \beta t_b} - \frac{\rho_0^r}{1 + \beta t_r} \right) \frac{B}{760} - \frac{\mu}{2 d_{\text{ср}}} \rho_0^r \left[\frac{\omega_{01}^2}{2g} (1 + \beta t_1^r) + \frac{\omega_{02}^2}{2g} (1 + \beta t_2^r) \right]},$$

где H — высота дымовой трубы, м (индекс 0 означает, что параметр относится к нормальным условиям 0°C; 760 мм рт. ст.: индексы 1 и 2 относятся к параметрам соответственно у основания трубы и устья трубы);

t_b — средняя температура газов в трубе °C;

t_b — средняя температура воздуха по высоте дымовой трубы, °C:

$$t_b = t_b' - \frac{\sqrt{H}}{2},$$

где t_b' — температура воздуха у основания трубы, зависящая от климатических условий. Для умеренного климата $t_b' = 20^\circ\text{C}$, для жаркого $t_b' = 30^\circ\text{C}$;

B — минимальное барометрическое давление для данной местности, мм рт. ст.; B , кН/м²;

K_3 — коэффициент запаса;

$d_{\text{ср}}$ — средний диаметр трубы, м;

μ — коэффициент трения в трубе, для кирпичных труб $\mu = 0,05$, для металлических $\mu = 0,03$.

Скорость в устье дымовой трубы назначают в пределах $\omega_{02} = 2 \div 4$ м/с и определяют

$$d_{\text{уст}} = \sqrt{4V/\pi \omega_{02}}.$$

Из конструктивных соображений принимают $d_{\text{уст}} > 800$ мм, а диаметр основания дымовой трубы $d_{\text{осн}} = 1,5 d_{\text{уст}}$;

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{осн}} + d_{\text{уст}}}{2}.$$

Тепловые потери на 1 м высоты дымовых труб составляют: для металлических футерованных труб от 40 (при $H = 25$ м) до 50 кВт (при $H = 100$ м) и для кирпичных труб от 20 (при $H = 25$ м) до 30 кВт (при $H = 100$ м). Падение температуры газов при прохождении по дымовой трубе принимают 1°C на 1 м высоты трубы для кирпичных и 3—4°C для металлических нефутерованных труб.

По номограмме рис. 132 определяют ориентировочную высоту дымовой трубы H' и по ней необходимые температуры. После этого подставляют все значения в формулу и определяют высоту дымовой трубы H , м.

Если здания вокруг трубы находятся на расстоянии, меньшем 100 м, то высота трубы должна быть на 5 м выше конька крыши здания, но не менее 16 м. Если продукты сгорания содержат в увеличенных количествах вредные газы (N_2O_5 , SO_2 и др.), то высота трубы должна превышать 100 м. Дымовые трубы имеют высоту до 320 м (кирпичные до 120 м).

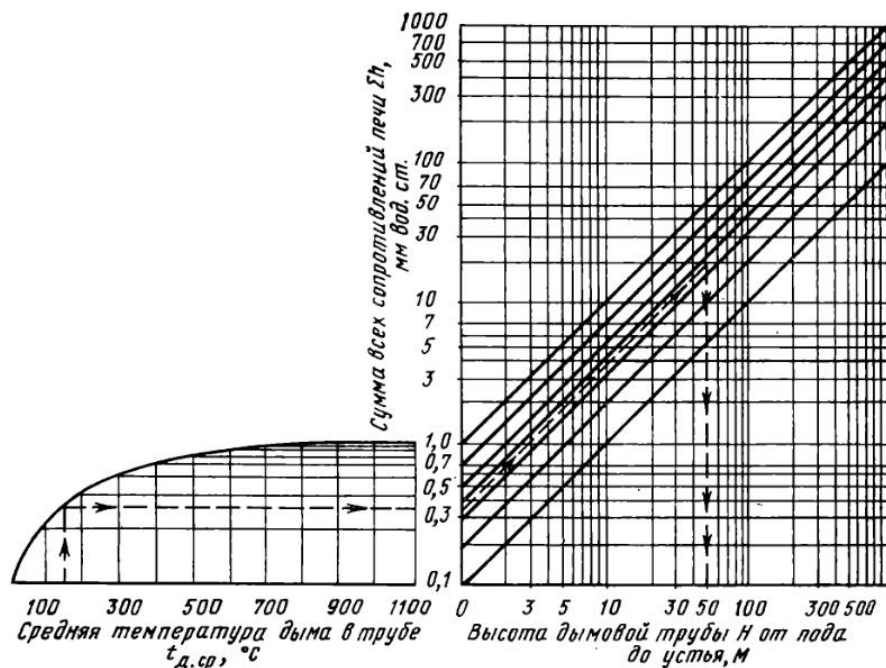


Рис. 132. График для определения высоты дымовой трубы

При больших сопротивлениях системы газоходов (например, при установке котлов-утилизаторов) для удаления продуктов горения из печей используются вентиляторы-дымососы. Характеристики дымососов даны в приведенных ниже табл. X-1—X-6 и на рис. 133 и др.

Таблица X-1

Характеристика дымососов на одной оси с электродвигателем серии В Бийского завода при различных значениях скорости вращения n , об/мин

Номер вентилятора	$n = 725$			$n = 960$			$n = 1425$		
	Q , м ³ /ч	H , мм вод. ст.	N , кВт	Q , м ³ /ч	H , мм вод. ст.	N , кВт	Q , м ³ /ч	H , мм вод. ст.	N , кВт
При $t_{в} = 20^{\circ}C$									
В № 8	5000	73	1,8	6000	129	4,0	7000	295	16,0
	9000	70	2,8	12000	123	6,0	17000	285	25,0
	13000	63	4,0	18000	109	9,0	27000	245	40,0
	17000	50	5,1	24000	85	12,2	37000	180	55,0
В № 9	6000	92	3,0	8000	161	7,0	10000	368	32,0
	12000	87	4,6	15000	156	10,0	23000	358	35,0
	18000	78	6,5	22000	143	15,0	36000	315	50,0
	24000	64	9,0	30000	120	20,0	50000	238	74,0

Номер вентилятора	n = 725			n = 960			n = 1425		
	Q, м³/ч	H, мм вод. ст.	N, кВт	Q, м³/ч	H, мм вод. ст.	N, кВт	Q, м³/ч	H, мм вод. ст.	N, кВт
В № 12	12000	168	12,5	15000	290	27,0	—	—	—
	28000	160	18,0	33000	282	39,0	—	—	—
	44000	140	28,0	51000	261	58,0	—	—	—
	60000	110	40,0	70000	210	81,0	—	—	—
При $t_B = 200^\circ\text{C}$									
В № 9	6000	57	1,7	8000	100	4,6	10000	230	15,0
	12000	55	2,8	15000	99	6,7	23000	220	22,0
	18000	50	4,1	22000	95	9,2	36000	200	33,0
	24000	40	5,4	30000	78	12,2	50000	152	46,0
В № 12	12000	102	6,0	15000	180	17,0	—	—	—
	28000	98	11,0	33000	177	26,0	—	—	—
	44000	91	16,0	51000	170	37,0	—	—	—
	60000	65	23,0	70000	135	51,0	—	—	—

Таблица X-2

Дымососы с шестилопастным колесом ЦАГИ одностороннего всасывания

Тип	Максимальная производительность Q_{max} , м³/ч	n, об/мин	Полное давление H, мм вод. ст.	К. п. д. при $\frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{опт}}}$	Потребляемая мощность N, кВт	Масса нетто, кг	Направляющие аппараты	
							тип	диаметр, мм
Д-9	18000	730	43	49/55	4,5	786	Д-308	{ 630
	24000	960	75	49/55	14,0	786		
	36000	1450	172	49/55	40,0	786		
Д-12	44000	730	85	59/66	20,0	1541	Д-312	{ 840
	58000	960	145	59/66	55,0	1541		
Д-12к	20000	730	96	—	14,0	1660	ОК-840	{ 840
	25000	960	160	—	28,0	1660		
Д-14к	40000	730	120	—	40,0	2150	ОК-980	980

Примечание. Технические данные приведены для температуры отсасываемых газов 200°C .

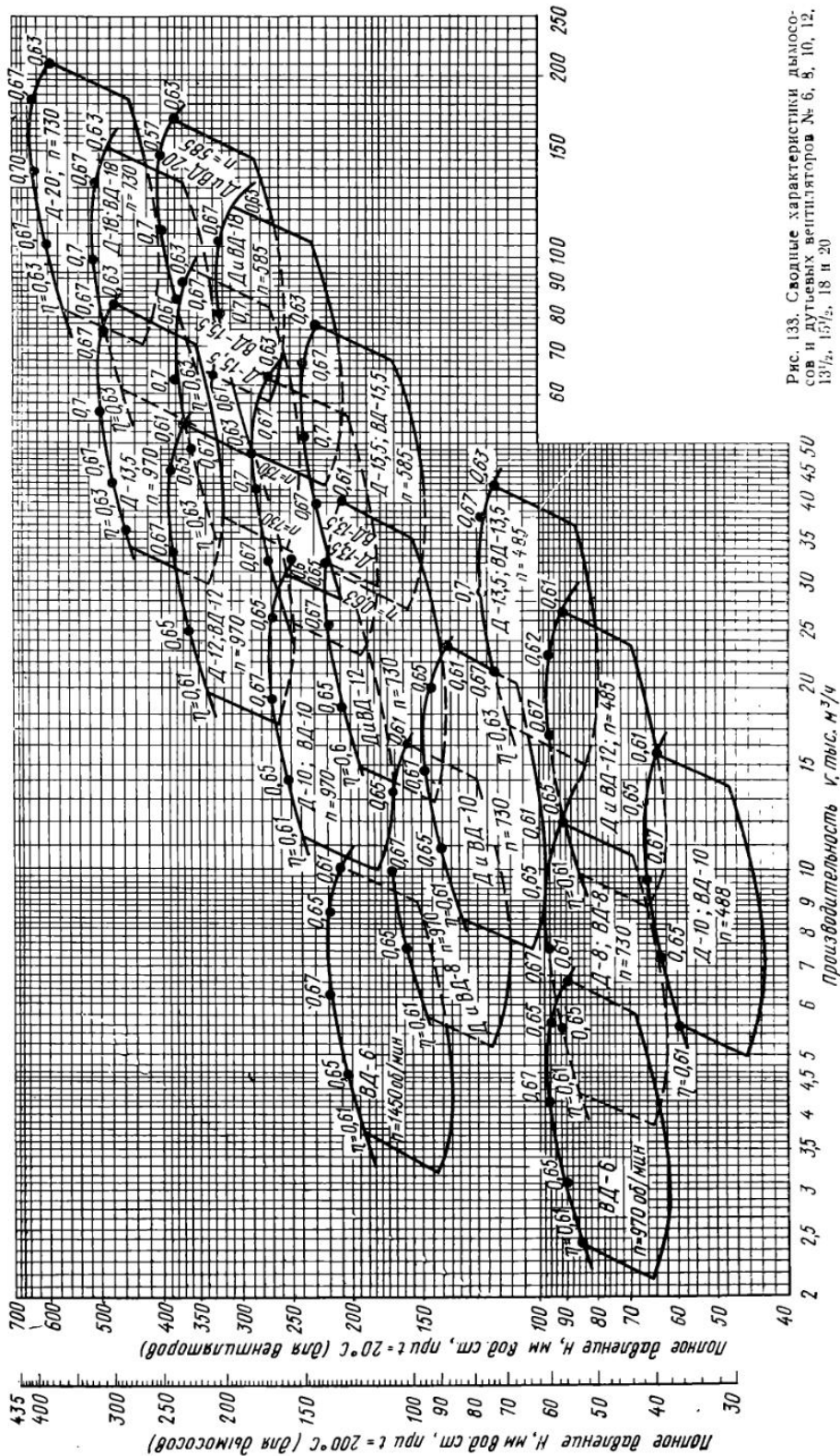


Рис. 133. Сводные характеристики дымососов и дутьевых вентиляторов № 6, 8, 10, 12, 13^{1/2}, 15^{1/2}, 18 и 20

Таблица X-3

Дымососы с многолопастными колесами одностороннего всасывания типа Д-10

Тип	Максимальная производительность Q_{\max} , м ³ /ч	n , об/мин	Полное давление H , мм вод. ст.	К. п. д. при $\frac{Q_{\max}}{Q_{\text{опт}}}$	Потребляемая мощность N , кВт	Момент инерции ротора, кг·м ²	Масса нетто, кг
Д-10-12,5 Н ₃₀	105000	730	155	54/60	80	93	1915
	135000	960	265	54/60	180	93	1915
Д-10-13 Н ₃₀	115000	730	165	54/60	95	111	1960
	155000	960	285	54/60	220	111	1960
Д-10-13,5 Н ₃₀	130000	730	175	54/60	120	128	2000
	170000	960	310	54/60	265	128	2000
Д-10-14 Н ₃₀	145000	730	190	54/60	140	127	1980
	190000	960	330	54/60	320	127	1980
Д-10-14,5 Н ₃₀	160000	730	160	54/60	165	154	2025
	210000	960	210	54/60	385	154	2025
Д-10-12,5 Н ₄₀	105000	730	135	54/60	70	86	1900
	130000	960	235	54/60	155	86	1900
Д-10-13 Н ₄₀	115000	730	150	54/60	85	102	1935
	155000	960	255	54/60	200	102	1935
Д-10-13,5 Н ₄₀	130000	730	160	54/60	100	116	1975
	170000	960	275	54/60	240	116	1975
Д-10-14 Н ₄₀	145000	730	175	54/60	125	123	1955
	190000	960	295	54/60	290	123	1955
Д-10-14,5 Н ₄₀	160000	730	185	54/60	145	140	1995
	210000	960	320	54/60	340	140	1995
Д-10-12,5 Э	57000	730	88	50/56	28	95	1840
	75000	960	155	50/56	63	95	1840
Д-10-13 Э	65000	730	96	50/60	35	76	1855
	85000	960	167	50/60	78	76	1855
Д-10-14 Э	80000	730	112	50/60	48	94	1880
	105000	960	190	50/60	110	94	1880
Д-10-14,5 Э	90000	730	120	50/60	60	101	1890
	118000	960	205	50/60	130	101	1890

Примечание. Технические данные указаны для температуры всасываемого воздуха (газа) 200°С.

Таблица X-4

Дымососы с многолопастными колесами одностороннего всасывания типа Д-11

Тип	Максимальная производительность Q_{max} , м ³ /ч	n , об/мин	Полное давление H , мм вод. ст.	К. п. д. при $\frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{опт}}}$	Потребляемая мощность N , кВт	Момент инерции ротора, кг·м ²	Масса нетто, кг
Д-11-15 Н ₃₀	190000	730	210	58/65	220	216	3880
Д-11-15,5 Н ₃₀	220000	730	225	58/65	280	230	3900
Д-11-16 Н ₃₀	240000	730	240	58/65	330	263	3940
Д-11-16,5 Н ₃₀	270000	730	250	58/65	380	276	3920
Д-11-17 Н ₃₀	290000	730	270	58/65	440	295	3940
Д-11-17,5 Н ₃₀	310000	730	280	58/65	490	331	4000
Д-11-15 Н ₄₀	185000	730	190	58/65	185	216	3880
Д-11-15,5 Н ₄₀	205000	730	205	58/65	220	230	3900
Д-11-16 Н ₄₀	225000	730	220	58/65	250	263	3940
Д-11-16,5 Н ₄₀	245000	730	235	58/65	280	276	3920
Д-11-17 Н ₄₀	270000	730	250	58/65	340	295	3940
Д-11-17,5 Н ₄₀	290000	730	265	58/65	390	331	4000

Примечание. Технические данные указаны для температуры всасываемого воздуха (газа) 200°С.

Таблица X-5

Дымососы двустороннего всасывания типов Д-75, Д-100, Д-190 и Д-300

Тип	Производительность Q , м ³ /ч	n , об/мин	Полное давление H , мм вод. ст.	Мощность электродвигателя N , кВт	Момент инерции колеса, кг·м ²	Температура всасываемого воздуха, °С	Масса нетто, кг
Д-75/1200	75000	1450	1240	520	245	80	4500
Д-100/220	100000	960	270	155	58	200	2890
Д-190	260000	960	435	570	420	200	9200
Д-190	210000	730	250	260	420	200	9200
Д-190-1	230000	960	290	380	201	200	9200
Д-190-1	180000	730	165	165	201	200	9200
Д-190-2	240000	960	375	480	210	200	9200
Д-190-2	180000	730	218	240	210	200	9200
Д-300/400	310000	730	425	750	1671	200	16300
Д-300/400	260000	580	270	480	1671	200	16300

Примечания: 1. Дымососы типов Д-190 и Д-300 поставляются комплектно с всасывающими карманами, бронеплитами, подшипниками, фундаментной рамой, встроенным направляющим аппаратом шиберного типа с дистанционным ручным управлением, эластичной муфтой, но без электродвигателя.

2. Нагнетательная улитка дымососа Д-300/400 из-за больших габаритов поставляется узлами, окончательная сборка и сварка производятся на монтажной площадке силами и средствами заказчика.

3. Дымосос Д-75/1200 поставляется с одним карманом.

Таблица X-6

Котлы-утилизаторы, устанавливаемые за мартеновскими печами

Марка	Расчетные параметры за печных газов		Расчетная производительность (суммарная), т/ч, при давлении, кН/м ²				Температура перегрева пара, °С, при давлении, кН/м ²			Производительность дымососа, тыс. м ³ /ч	Емкость мартеновской печи т	Конструкция, изготовитель
	количество, м ³ /ч	температура, °С	1800		4500		1800		4500			
			с испарительным охлаждением	без испарительного охлаждения	с испарительным охлаждением	без испарительного охлаждения	с испарительным охлаждением	без испарительного охлаждения				
КУ-100у	100000/100000	650/550	29,3/19,4	30,0/20,2	21,6/—	400/382	385/365	390/—	400/382	230	500	ЦЭЧМ, ТКЗ
КУ-80у	80000/60000	650/550	25,2/17,0	26,0/17,5	17,3/—	390/370	376/355	380/—	390/370	190	370	ЦЭЧМ, ТКЗ
КУ-60у	60000/45000	650/550	20,3/13,9	20,8/14,2	12,9/—	377/360	365/345	372/—	377/360	150	250	ЦЭЧМ, ТКЗ
КУ-80	77500/58000	650/550	—	—	15,2/8,9	—	—	375/367	—	190	370—500	ЦЭЧМ, ТКЗ
КУ-60	60000/42000	650/550	11,4/6,6	—	11,4/6,6	—	—	375/370	—	150	185—350	СЗЭЧМ, ТКЗ
КУ-50	50000/—	650/—	—	—	9,5/—	—	—	375/—	—	120	90—185	Гипроomez, ТКЗ
КУ-40	40000/28000	600/600	—	—	7,4/5,2	—	—	246/254	—	110	70—90	Гипроomez, ТКЗ

Примечания: 1. В числителе даны параметры при максимальной нагрузке, в знаменателе — при средней нагрузке.

2. Котлы-утилизаторы КУ-100у, КУ-80у и КУ-60у предназначены для комбинированной работы с системой испарительного охлаждения мартеновских печей. По этим котлам дана общая выработка пара (от котла и испарительного охлаждения). Котлы остальных марок не рассчитаны на комбинированную работу с системой испарительного охлаждения.

3. Все котлы, за исключением КУ-40, змеевикового типа с многократной принудительной циркуляцией воды; котел КУ-40 — газотрубный.

4. ТКЗ и Гипроomezом подготовлен выпуск котлов-утилизаторов КУ-30 и КУ-16 соответственно для мартеновских печей емкостью 50—70 и 30 т.

5. ЦЭЧМ, СЗЭЧМ и ТКЗ соответственно «Центроэнергомермет», «Севзапэнергомермет» и Таганрогский котлостроительный завод.

6. Котел КУ-40 в отличие от других рассчитан на работу с давлением пара 1300 кН/м².

7. Паропроизводительности котлов КУ-50 и КУ-60 пересчитаны с расчетных данных, относящихся к другим температурам газов перед котлами.

СТРУЙНОЕ ТЕЧЕНИЕ
ГАЗОВ

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

Истечение газов через отверстия, насадки и сопла в атмосферу при низких давлениях, порядка до 10 кН/м² (1000 мм вод. ст.), когда можно пренебречь изменением объема от изменения давления, рассчитывают по следующим формулам:

$$\omega = \sqrt{\frac{2(P-P_0)}{\rho}} \text{ м/с}; \quad V = \varphi \cdot F \sqrt{\frac{2h}{\rho}} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$G = \varphi \cdot F \sqrt{2h\rho} \text{ кг/с},$$

где φ — коэффициент сжатия струи.

Для отверстия с острыми кромками $\varphi=0,62$; для цилиндрического насадка $\varphi=0,85$, при закругленном входе в насадку $\varphi=1$.

Для диффузора с плавным входом за расчетную площадь F принимать площадь выходного сечения.

Расход через открытое окно из печи

$$V_t = \frac{2}{3} F \sqrt{\frac{2h_{\text{геом}}}{\rho_t^*}},$$

где ρ_t^* — плотность продуктов сгорания при температуре t , °С;
 $h_{\text{геом}}$ — геометрическое давление в верхней плоскости окна, Н/м².

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Процесс теоретического адиабатного истечения газа из резервуара под давлением P_1 и при начальной энтальпии i_1 , кДж/кг, в окружающую среду (атмосферу), характеризуемую давлением P и энтальпией i газа в конце процесса, описывается следующими формулами:

а. Критическое отношение давлений $\nu_{\text{кр}} < \frac{P}{P_1}$, дозвуковое истечение:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = 44,7 \sqrt{i_1 - i} \text{ м/с};$$

$$G = F \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = F \frac{44,7 \sqrt{i_1 - i}}{v} \text{ кг/с}.$$

б. Критическое отношение давлений $\nu_{\text{кр}} \geq \frac{P}{P_1}$:

$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_1 v_1} = 44,7 \sqrt{i_1 - i_{\text{кр}}} \text{ м/с};$$

$$G_{\text{max}} = F \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{P_1}{v_1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} \text{ кг/с};$$

$$\frac{T_1}{T} = \left(\frac{P_1}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad P_{\text{кр}} = P_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Таблица XI-1

Значения газовой постоянной R и показателя степени адиабаты k

Газ	R , Дж/(кг·°С)	Показатель степени адиабаты k при температурах t , °С														
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200		
Воздух	288	1,4	1,395	1,39	1,38	1,365	1,36	1,34	1,334	1,33	1,32	1,32	1,32	1,32	1,316	1,3
Оксид углерода	298	1,4	1,396	1,39	1,38	1,37	1,35	1,344	1,335	1,33	1,32	1,32	1,32	1,32	1,315	1,31
Водород	4125	1,41	1,4	1,4	1,393	1,39	1,39	1,39	1,385	1,375	1,37	1,37	1,365	1,36	1,36	1,35
Метан	520	1,3	1,27	1,23	1,194	1,17	1,16	1,14	1,13	1,12	1,15	1,15	1,11	1,11	1,11	1,1
Этан	278	1,2	1,15	1,25	1,11	1,095	1,09	1,08	1,07	1,07	1,065	1,065	1,065	1,06	1,06	1,06
Пропан	188	1,14	1,10	1,08	1,07	1,065	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,045	1,04	1,04	1,03
Бутан	143	1,1	1,075	1,06	1,05	1,048	1,044	1,04	1,038	1,038	1,036	1,036	1,032	1,03	1,03	1,03
Этилен	298	1,26	1,20	1,16	1,14	1,12	1,11	1,105	1,10	1,094	1,09	1,09	1,09	1,085	1,08	1,08
Ацетилен	320	1,25	1,21	1,185	1,17	1,17	1,16	1,15	1,144	1,14	1,134	1,134	1,13	1,13	1,13	1,13
Шебеллинский природный газ	475	1,3	1,27	1,23	1,19	1,17	1,16	1,14	1,13	1,12	1,12	1,12	1,11	1,11	1,11	1,1
Елшанский природный газ	476	1,31	1,29	1,22	1,19	1,17	1,15	1,14	1,13	1,13	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,1
Изербашский природный газ	—	1,25	1,21	1,17	1,15	1,13	1,12	1,11	1,11	1,1	1,1	1,1	1,09	—	—	—
Доменный газ	294	1,39	1,38	1,36	1,35	1,34	1,33	1,32	1,31	1,3	1,3	1,3	1,29	—	—	—
Азот	298	1,4	1,4	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34	1,33	1,325	1,325	1,32	1,32	1,31	1,31
Кислород	260	1,4	1,39	1,37	1,35	1,35	1,34	1,32	1,31	1,31	1,30	1,30	1,3	1,3	1,3	1,3
Водяной пар (перегретый)	462	1,33	1,33	1,32	1,30	1,29	1,275	1,265	1,255	1,254	1,24	1,24	1,23	1,22	1,22	1,22

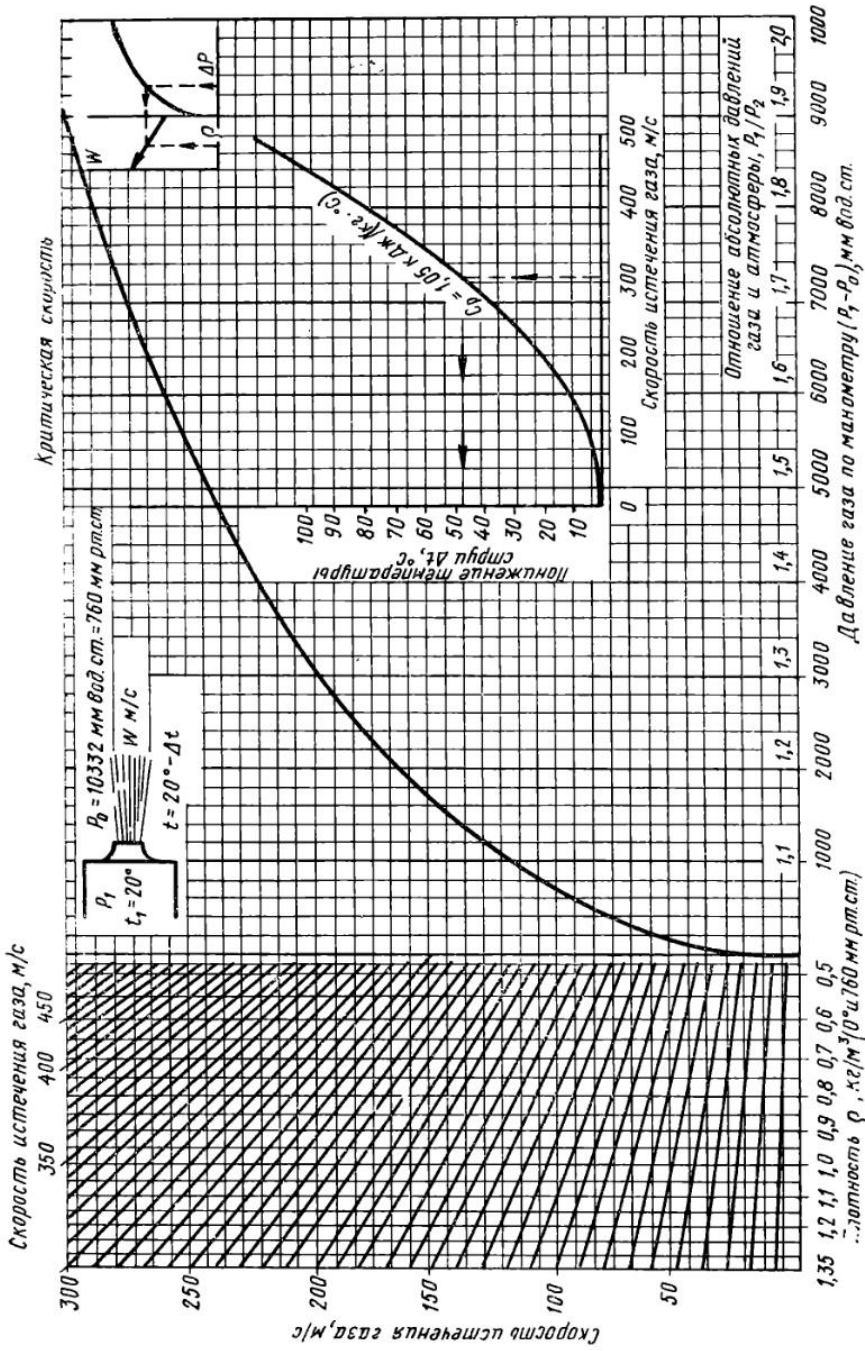


Рис. 134. Скорость истечения газов при больших давлениях

Для двухатомных газов при $k=1,4$ значение $P_{кр}=0,528 P_1$; для сухого насыщенного пара $k=1,135$; $P_{кр}=0,577 P_1$; для перегретого пара $k=1,33$ значение $P_{кр}=0,546 P_1$; для трех- и многоатомных газов $k=1,29$, $P_{кр}=0,548 P_1$.

Приведенные формулы справедливы, если можно пренебречь потерями давления на трение при вытекании газа через отверстие.

Для определения действительной скорости истечения газа необходимо вводить поправку на трение — коэффициент скорости $\alpha=0,96-0,97$. При определении действительного расхода необходимо вводить в формулу коэффициент сжатия струи $\varphi < 1$. Произведение $\varphi \times \alpha$ именуется коэффициентом расхода μ . Тогда $G = \mu F w_p$, где

$$\mu = 0,87 - 0,25 \frac{P}{P_1}; \quad 0,62 < \mu < 0,87.$$

Для случая истечения газа в атмосферу с давлением $P_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ (1 ата) скорость может быть определена по номограмме рис. 134 для различных плотностей газов.

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ЧЕРЕЗ СОПЛО ЛАВАЛЯ

Истечение газов и паров с $P_{нач} > P_{кр}$ через сопло Лавалья приводит к получению скоростей движения, превышающих критическую скорость истечения. Ниже даны выражения, необходимые для расчета параметров сопла Лавалья. Начальные параметры газа обозначены индексом 1, конечные — без индекса и текущие (промежуточные) — индексом l ; w_{max} — предельное значение скорости истечения газа при полном использовании внутреннего запаса энергии:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}; \quad w_{max} = \sqrt{\frac{k}{k-1} 2RT_1};$$

$$\frac{P_l}{P_1} = \left(\frac{T_l}{T_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad F_l = \frac{G \cdot V_l}{w_l};$$

$$w_l = \sqrt{\frac{k}{k-1} 2RT_1 \left(1 - \frac{T_l}{T_1}\right)}; \quad d_l = \sqrt{\frac{4G}{\pi \rho_l w_l}};$$

$$l = \frac{w_{max}}{b} \left(\ln \frac{1 + \frac{w_l}{w_{max}}}{1 - \frac{w_l}{w_{max}}} - 2 \frac{w_l}{w_{max}} \right),$$

$$\beta_{кр} \cdot P_1 = v_{кр} \cdot P_1 = P_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} P_1; \quad T_{кр} = \frac{2}{k+1} T_1;$$

$$v_{кр} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} v_1; \quad w_{кр} = \sqrt{\frac{k}{k-1} 2R(T_1 - T_{кр})};$$

$$F_{min} = \frac{G \cdot v_{кр}}{w_{кр}}.$$

Для получения сопла Лавалья с углом раскрытия порядка 10° принимают $b \approx 5000$. Задавая значение T_l и отношение T_l/T_1 , находят параметры сопла l , P_l , v_l , w_l , F_l , d_l . Проведя несколько таких последовательных расчетов, получают необходимые данные для построения продольного профиля сопла Лавалья.

Теоретический профиль сопла Лавала имеет переменный угол раскрытия, постепенно увеличивающийся в области низких давлений.

Расчет конического сопла Лавала можно также выполнить с помощью газодинамических функций, представленных для различных газов (отличающихся величиной k) на рис. 135. Значения функций даны в зависимости от величины λ , которая представляет собой относительную скорость потока $\lambda = \omega/\omega_{кр}$. Она изменяется от $\lambda=0$ в начале сопла до $\lambda=1$ в критическом сечении, когда скорость течения потока достигает значения, равного скорости звука, и затем превышает ее в расширяющейся части насадки, где $\lambda > 1$.

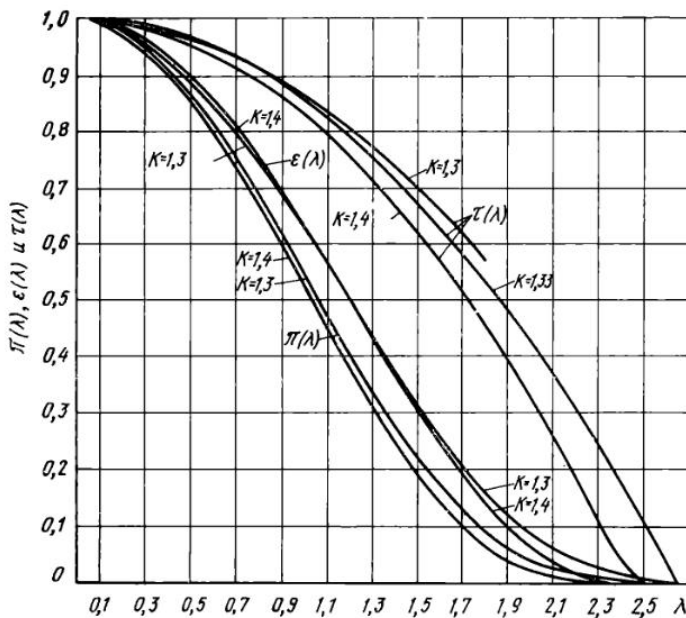


Рис. 135. Газодинамические функции

Текущие параметры потока T_l , ρ_l или v_l , P_l , ω_l определяются через газодинамические функции

$$\omega_l = \lambda \cdot \omega_{кр} \text{ м/с}; \quad \frac{\omega_l}{\omega_{кр}} = \lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \pi(\lambda)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

$$P_l = P_1 \pi(\lambda) \text{ Н/м}^2; \quad \frac{P_l}{P_1} = \pi(\lambda) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$\rho_l = \rho_1 \cdot \varepsilon(\lambda) \text{ кг/м}^3; \quad \frac{\rho_l}{\rho_1} = \varepsilon(\lambda) = \pi(\lambda)^{\frac{1}{k}};$$

$$T_l = T_1 \cdot \tau(\lambda) \text{ К}; \quad \frac{T_l}{T_1} = \tau(\lambda) = \pi(\lambda)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Задавая $\lambda=1$, находят параметры потока в критическом сечении и определяют площадь критического сечения $F_{кр}$ по формуле

$$F_{кр} = \frac{G \cdot \sqrt{T_1}}{k_r \cdot P_1} \text{ мм}^2,$$

где G — расход газа, кг/с;

P_1 — давление газа перед соплом, МН/м²;

T_1 — температура газа перед соплом, К;

$$k_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{k}{R}}, \quad \text{°C}^{1/2} \cdot \text{с/м};$$

R — газовая постоянная, Н·м/(кг·°С), Дж/(кг·°С).

Далее, принимая для расчетного режима $P_l = 0,0981$ МН/м², определяют $\pi(\lambda)$ и все остальные параметры струи. Площадь выходного сечения сопла находится из выражения

$$F_{\text{вых}} = \frac{G \cdot 10^6}{\omega \cdot \rho} \text{ мм}^2.$$

Длина сопла определяется по предельному углу раскрытия сопла $\alpha \approx 12^\circ$.

Т а б л и ц а XI-2

Термодинамические характеристики газов

Газ	$k = c_p/c_v$	$\gamma_{\text{кр}} = \beta_{\text{кр}}$	$P_1 = P_{\text{кр}}^{\gamma_{\text{кр}}}$ МН/м ²	R , Дж/(кг·°С)	k_{Γ} , °C ^{1/2} ·с/м
Компрессорный воз- дух	1,40	0,528	0,186	287	0,0404
Кислород	1,40	0,528	0,186	260	0,0425
Перегретый пар . . .	1,33	0,540	0,181	462	0,0313
Природный газ	1,31	0,545	0,180	475—491	0,0304
Продукты сгорания природного газа . . .	1,30	0,547	0,180	289	0,0393

АЭРОДИНАМИКА СТРУИ

В гидравлике принято струю капельной жидкости, окруженную газом, считать незатопленной, а струю, окруженную жидкостью, примерно той же плотности — затопленной. Кроме того, выделяют особо два класса движений: свободные, происходящие вдалеке от твердых поверхностей и подчиняющиеся закономерностям так называемой «свободной турбулентности», и пристеночные, в отличие от предыдущих развивающиеся вблизи твердых поверхностей и описываемые закономерностями «пристеночной турбулентности».

Схема свободной турбулентной затопленной струи приведена на рис. 136.

Для начального сечения F_0 при истечении газа с осевой скоростью ω_0 среднюю скорость $\omega_{0\text{ср}}$, расход V_0 , количество движения I_0 и кинетическую энергию E_0 определяют из следующих выражений:

$$\omega_{0\text{ср}} = k_{01} \omega_0 \text{ м/с}; \quad V_0 = F_0 k_{01} \omega_0 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$G_0 = F_0 \rho_0 k_{01} \omega_0 \text{ кг/с}; \quad I_0 = \rho_0 F_0 k_{01} \omega_0 k_{02} \omega_0 \text{ Н}; \quad \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2};$$

$$E_0 = \frac{\rho_0}{2} F_0 k_{01} \omega_0 k_{02} \omega_0 k_{03} \omega_0 \text{ Дж/с}; \quad \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}; \quad \text{Вт};$$

где ρ_0 — плотность истекающего газа.

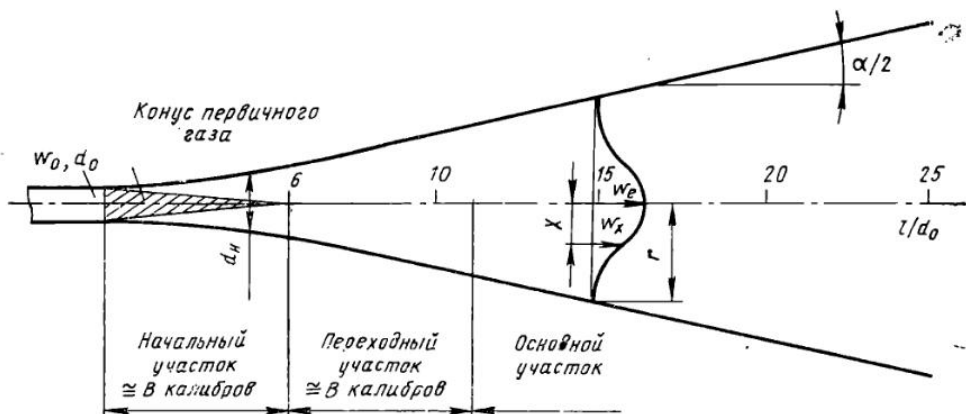


Рис. 136. Схема свободной струи

Значения коэффициентов усреднения скорости при определении расхода k_{01} , количества движения k_{02} и кинетической энергии k_{03} для трубы круглого сечения в зависимости от числа Re приведены на рис. 137.

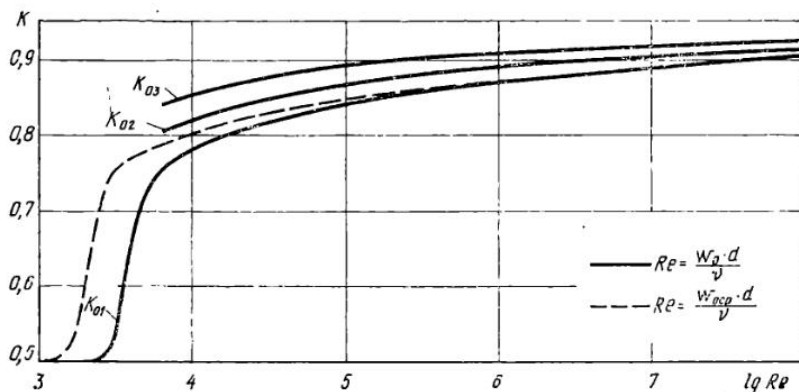


Рис. 137. Зависимость усредняющих коэффициентов k_{01} , k_{02} , k_{03} от числа Рейнольдса для круглой трубы

Для поперечного сечения в области основного участка струи при $l \gg 6$ справедливы следующие соотношения:

$$\omega_l = \omega_0 \frac{d_0}{l} B; \quad B = \sqrt{\frac{k_{01} k_{02} \rho_0}{k_1 k_2 \rho_{см} b^2}} = 5,6 \div 6;$$

$$b^2 = 0,44 \frac{k_{01} - 0,5}{k_{01}}; \quad d_l = b \cdot l;$$

$$b = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}; \quad \omega_x = \omega_l \left[1 - \left(\frac{x}{r} \right)^{3/2} \right]^2;$$

$$G_l = \frac{G_0 k_{02} l}{B k_2 d_0} \approx 0,316 \frac{l}{d_0} G_0;$$

$$V_l = \frac{V_0 \rho_0 k_{02} l}{B \rho_l k_2 d_0}; \quad I_l = I_0;$$

$$E_l = \frac{G_0 k_{02} k_3 \omega_0^2}{2} \cdot \frac{d_0}{l} \cdot B = I_0 \omega_0 \frac{k_3}{2} \frac{d_0}{l} B,$$

где $k_1=0,26$; $k_2=0,51$; $k_3=0,66$ и не зависят от Re . Угол раскрытия струи $18^\circ < \alpha < 26,5^\circ$; практически $\alpha = 22 \div 24^\circ$.

Для поперечного сечения в области начального участка струи при $l < 6$ следует пользоваться следующими формулами:

$$\omega_{\text{ось н}} = \omega_0; \quad G_n = G_0 \sqrt{1 + \frac{b^2 k_1 k_{02} \rho l}{k_{01} k_2 \rho_0} \left(\frac{l}{d_0}\right)^2};$$

$$d_n = d_0 \sqrt{1 + b^2 \left(\frac{l}{d_0}\right)^2}.$$

Индексы: 0 — выходное сечение насадки; l — параметры поперечного сечения струи на расстоянии l от выходного сечения; x — расстояние x от оси поперечного сечения; «н» — начальный участок струи.

Струи, истекающие из насадок квадратного и прямоугольного сечений, в дальнейшем превращаются в круглую струю. Для квадратного насадка этот процесс заканчивается на $L \approx 6 d_0$, а для прямоугольного — в зависимости от соотношения сторон; так, $L = 19 d_0$ при соотношении сторон прямоугольника, равном 1,7. При расчетах можно пользоваться закономерностями круглой струи, введя эквивалентную замену и исходя из условия равенства количества движения струи круглого и прямоугольного сечений.

СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ

Струйные аппараты предназначены для нагнетания либо для удаления газов или паров. Аппарат называется инжектором, если его основной задачей является нагнетание смешанного потока в пространство за камерой смешения. Если аппарат предназначен для создания разрежения перед камерой смешения, его называют эжектором. В качестве рабочей среды в струйных аппаратах можно применять либо газы (сжатый воздух, природный газ, водяной пар и др.), либо жидкости (вода и др.). Схема струйного аппарата показана на рис. 138.

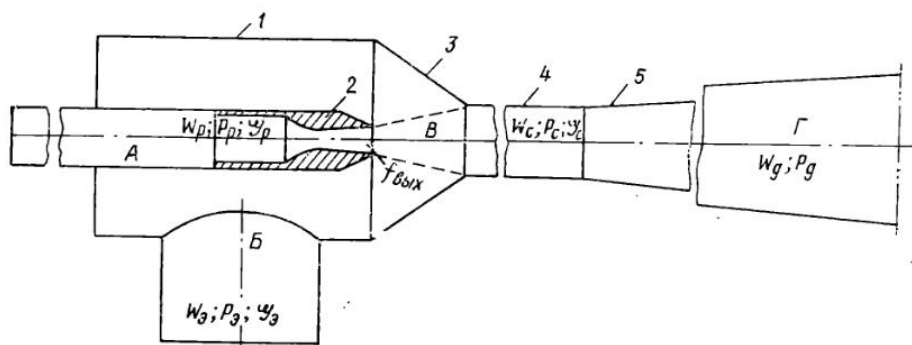


Рис. 138. Схема струйного аппарата

1 — приемная камера; 2 — рабочее сопло; 3 — входной участок камеры; 4 — камера смешения; 5 — диффузор; А — рабочая среда; Б — эжектируемая среда; В — свободная струя; Г — смешанный поток

Установка диффузора на выходе смешанного потока резко увеличивает общий к. п. д. струйного прибора.

Поставленные у букв индексы «р», «э», «с», «д» относятся соответственно к параметрам потоков: рабочего, эжектируемого, смешанного и в диффузоре.

Оптимальные значения действительных скоростей истечения w_p и w_c определяют из выражений:

$$\begin{aligned} w_{p, \text{ опт}} &= w_3 \frac{G_3}{G_p} \frac{1}{(2 - \eta_d) \left(1 + \frac{G_3}{G_p}\right) \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + \frac{G_3}{G_p}\right) - \left(\frac{G_3}{G_p}\right)^2} = \\ &= \frac{w_3 U}{(2 - \eta_d) (1 + U) \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + U\right) - U^2}; \\ w_{c, \text{ опт}} &= \frac{w_3 \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + \frac{G_3}{G_p}\right)}{(2 - \eta_d) \left(1 + \frac{G_3}{G_p}\right) \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + \frac{G_3}{G_p}\right) - \left(\frac{G_3}{G_p}\right)^2} = \\ &= \frac{w_3 \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + U\right)}{(2 - \eta_d) (1 + U) \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + U\right) - U^2}, \end{aligned}$$

где η_d — коэффициент полезного действия диффузора, равный 0,8—0,85;

$$U = \frac{G_3}{G_p} = \frac{V_3}{V_p} \cdot \frac{\rho_3}{\rho_p} \text{ — коэффициент инжекции.}$$

При равенстве плотностей рабочей и эжектируемой сред ($\rho_p = \rho_3$) уравнения упрощаются:

$$\begin{aligned} w_{p, \text{ опт}} &= \frac{w_3 U}{(2 - \eta_d) (1 + U)^2 - U^2}; \\ w_{c, \text{ опт}} &= \frac{w_3 (1 + U)}{(2 - \eta_d) (1 + U)^2 - U^2}. \end{aligned}$$

Давление, которое должен преодолеть инжектор, определяется следующим образом:

$$\Delta P = (P_d - P_3) + (1 + \zeta_3) \frac{\rho_3 w_p^2}{2},$$

где ζ_3 — коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления при прохождении эжектируемой среды до смесителя.

С другой стороны, из теории инжекции противодавление определяется:

$$\Delta P = \frac{\rho_c [G_p w_3 w_c + G_3 w_p w_c - (G_p + G_3) w_c^2]}{(G_p + G_3)} + \eta_d \frac{\rho_c (w_c^2 - w_d^2)}{2}.$$

В качестве вспомогательного уравнения для определения недостающих величин можно использовать основное уравнение энергетического баланса струйного прибора:

$$\begin{aligned} \frac{G_p w_p^2}{2} + \frac{G_3 w_3^2}{2} &= (G_p + G_3) \frac{w_d^2}{2} + \left(\frac{G_p}{\rho_p} + \frac{G_3}{\rho_3}\right) (P_d - P_3) + G_p \frac{(w_p - w_c)^2}{2} + \\ &+ G_3 \frac{(w_3 - w_c)^2}{2} + (G_p + G_3) \frac{(w_c^2 - w_d^2)}{2} (1 - \eta_d). \end{aligned}$$

Геометрические параметры струйного прибора выбирают исходя из условия получения наименьших потерь энергии на основании приведенных в настоящем разделе данных по аэродинамике струи, истечению га-

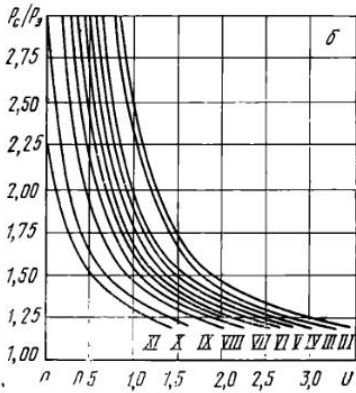
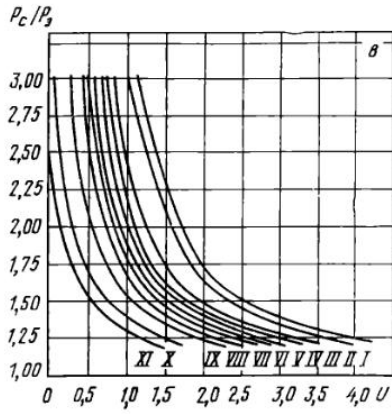
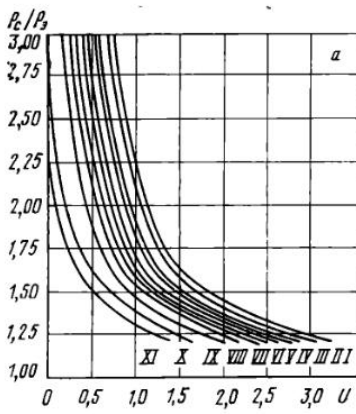


Рис. 139. Зависимость расчетного коэффициента инжекции U струйного компрессора от расчетной степени сжатия P_c/P_3 и от располагаемой степени расширения P_p/P_3 :
 а — двухатомный газ, $k=1,4$; б — перегретый водяной пар, $k=1,3$; в — сухой насыщенный пар, $k=1,13$

Номер кривой	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
P_p/P_3	75	50	25	20	15	12	10	8	6	4	3,2

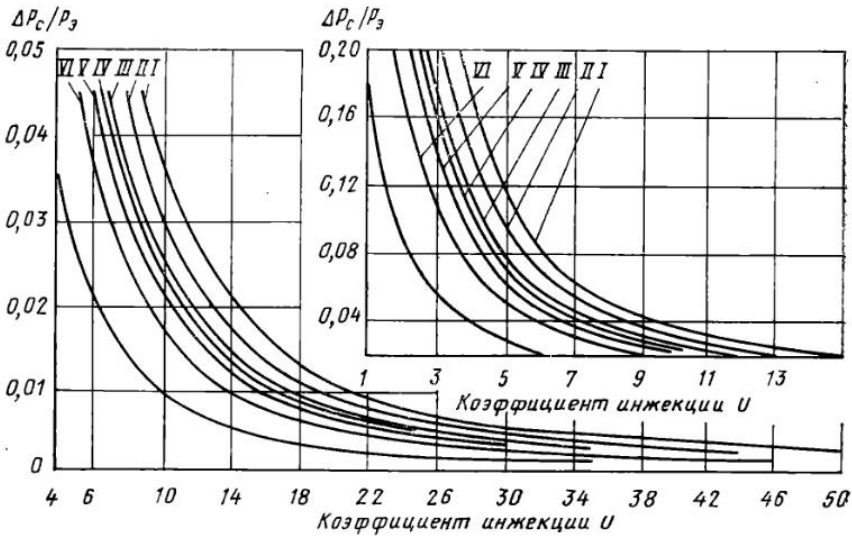


Рис. 140. Зависимость $\frac{\Delta P_c}{P_3} = f(U)$ для инжекционных компрессоров

Номер кривой	I	II	III	IV	V	VI	VII
P_p/P_3	50	30	10	5	6	4	2

зор из отверстий и коэффициентов местных сопротивлений. Длину цилиндрической части инжектора принимают равной 3—6 диаметрам.

При большой степени расширения рабочей среды $\left(\frac{P_p}{P_3} > 2\right)$ рекомендуется расчетный массовый коэффициент инжекции $U = G_a/G_p$ определять по рис. 139 в зависимости от располагаемой степени расширения рабочей среды P_p/P_3 и расчетной степени сжатия P_c/P_3 либо по рис. 140 в зависимости от значений

$$\frac{\Delta P_c}{P_3} = \frac{P_c - P_3}{P_3} \text{ и } \frac{P_p}{P_3}.$$

Графики построены при условии равенства температур рабочей t_p и эжектируемой t_a сред; если $t_p > t_a$, то коэффициент инжекции немного возрастает:

$$U_t = U \sqrt{T_p/T_a}.$$

Другие необходимые параметры определяют из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \omega_{p, \text{кр}} &= \sqrt{2 \frac{k}{k+1}} \sqrt{P_p v_p}; & \omega_{a, \text{кр}} &= \sqrt{2 \frac{k}{k+1}} \sqrt{P_3 v_3}; \\ \omega_{d, \text{кр}} &= \sqrt{2 \frac{k}{k+1}} \sqrt{P_d v_d}; & F_{p, \text{кр}} &= \frac{G_p}{A} \sqrt{\frac{v_p}{P_p}}; \\ F_{p, \text{вых}} &= F_{p, \text{кр}} B \frac{1}{\left(\frac{P_3}{P_p}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_3}{P_p}\right)^{\frac{k-1}{k}}}}; \\ F_c &= F_{p, \text{кр}} B (1 + U) \frac{\omega_{d, \text{кр}}}{\omega_{p, \text{кр}}} \frac{P_p}{P_d} \frac{1}{\left(\frac{P_c}{P_d}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_c}{P_d}\right)^{\frac{k-1}{k}}}}, \end{aligned}$$

где

$$A = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}; \quad B = \sqrt{\frac{k-1}{2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}.$$

Для сухого насыщенного пара $k=1,13$; $\frac{1}{k} = 0,885$; $A=0,635$; $B=0,151$.

Для перегретого пара $k=1,3$; $\frac{1}{k} = 0,77$; $A=0,667$; $B=0,226$.

Для двухатомных газов $k=1,4$; $\frac{1}{k} = 0,714$; $A=0,682$; $B=0,258$.

Длину цилиндрической части принимают равной 6—10 диаметрам. Расстояние рабочего сопла от камеры смешения определяют из формул по аэродинамике свободной струи, рабочее сопло и диффузор — на основании изложенных выше соображений.

ФАКЕЛ ПЛАМЕНИ

Сжигание газообразного топлива либо распыленного жидкого или твердого топлива в кислородсодержащей атмосфере приводит к образованию факела пламени. Видимый факел представляет собой горящий светящийся поток раскаленных газов. Факел имеет определенную геометрическую форму и размеры, которые должны быть увязаны с размера-

ми рабочего или топочного пространства печи. Несоответствие этих параметров приводит к снижению к. п. д. установки, ухудшению стойкости огнеупорных материалов, загрязнению окружающей среды и другим нежелательным последствиям.

Наиболее изученным является факел, развивающийся в условиях свободной струи. Уравнение для расчета длины свободного турбулентного факела L_{Φ} , полученное Авериным С. И. и Семикиным И. Д., имеет следующий вид:

$$L_{\Phi} = d_0 \left[N_0 (1 + \omega) - \frac{1}{b_0} \right] \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_{\text{см}} \left[1 + I_{\text{в}} + Eu + f(\omega) f_1(\rho) \frac{z^3}{Pr} \right]}}$$

где $L = L_{\Phi}/d_0$ — безразмерная длина факела, выраженная в калибрах, диаметрах газового сопла d_0 ;

N_0 и b_0 — постоянные турбулентной струи, соответственно равные 11,2 и 0,47; $1/b_0 = 2,14$;

ω — стехиометрическое число, показывающее количество килограммов воздуха, необходимое для сжигания 1 кг газа по стехиометрическому расчету процесса горения, кг/кг;

$\omega = \frac{L_{\text{теор}} \rho_{0, \text{в}}}{\rho_{0, \text{г}}}$. Здесь $L_{\text{теор}}$ — объем воздуха, м³, теоретически необходимый для сжигания 1 м³ топлива, м³/м³;

$\rho_{0, \text{в}}$ и $\rho_{0, \text{г}}$ — соответственно плотности воздуха и газа при нормальных условиях, кг/м³;

$f(\omega)$ — безразмерная функция от стехиометрического числа ω ; при расчетах может быть принято $f(\omega) = 14,8 \cdot 10^{-4}$;

$f_1(\rho)$ — безразмерная функция характеристических плотностей;

$f_1(\rho) = \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{г}}} \left(\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{см}}} - 1 \right)$. Здесь $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{г}}$ — плотности воздуха и газа соответственно, кг/м³;

Плотность газа при низком избыточном давлении можно найти из уравнения $\rho_{\text{г}} = P/R \cdot T$. При $\omega_{\text{г}} \leq 0,4$ $\omega_{\text{кр}}$ изменением плотности газа при истечении можно пренебречь, рассматривая газ как несжимаемую жидкость.

При дозвуковых скоростях истечения

$$\rho_{\text{г}} = \frac{P_{\text{окр}}}{R \cdot T \cdot 2} \left(1 + \sqrt{1 + (k^2 - 1) \left(\frac{G}{G_{\text{кр}}^0} \right)^2} \right)$$

При истечении газа с критическими скоростями

$$\rho_{\text{г}} = \frac{P_{\text{кр}}}{R \cdot T} \cdot \frac{k + 1}{2},$$

где G — расход массы газа через сопло, кг/с;

$G_{\text{кр}}^0$ — секундный расход массы газа, который соответствует моменту становления критической скорости истечения, когда статическое давление в струе истекающего газа еще равно давлению в окружающей среде, а скорость истечения уже равна критической:

$$G_{\text{кр}}^0 = \omega_{\text{кр}} F_0 \rho_{\text{кр}}^0;$$

$$\rho_{\text{кр}}^0 = \frac{P_{\text{окр}}}{R T} \cdot \frac{k + 1}{2};$$

$\rho_{\text{см}}$ — плотность продуктов неполного сгорания в конце пути захвата стехиометрического количества воздуха, кг/м³.

Эту величину определяют по выражению

$$P_{см} = P_{г} \frac{\left[N_0 (1 + \omega) - \frac{1}{b_0} \right]^2}{(\sigma \Pi)^2},$$

где σ — постоянная, равная 0,48 (для Q_n^p в ккал/кг $\sigma_1=0,98$);
 Π — комплексный параметр, определяемый по формуле

$$\Pi = \sqrt{i_{п.г} \omega \rho_{г.}}$$

Здесь $i_{п.г}$ — калориметрическая энтальпия продуктов сгорания, образующихся при полном сжигании 1 кг газа, кДж/кг.

$$i_{п.г} = Q_n^p + i_{г.} + \omega i_{в.} \text{ кДж/кг.}$$

Значения комплексного параметра Π при истечении газа с дозвуковой скоростью в спокойный воздух при $t_{г.} = t_{в.} = 20^\circ\text{C}$, для некоторых газов приведены в табл. XI-3.

Т а б л и ц а XI-3

Значения комплексного параметра Π

Газ	Q_n^p , кДж/кг	Значения Π	Газ	Q_n^p , кДж/кг	Значения Π
Доменный (ДГ)	3310	27,6	Водород	120500	286
Генераторный	6000	49,2	Московский городской	44450	310
50% H_2 + 50% N_2	8090	52,0	Метан	50350	367
Окись углерода	10230	82,5	Шебелинский	48200	369
50% ДГ + 50% КГ	11560	86,5	Этан	47350	470
50% CO + 50% H_2	17600	108,0	Пропан	46500	540
Коксовый (КГ)	33300	188,0	Бутан	46150	630

Параметр Π показывает направление изменения длины факела при переходе от одного газа к другому. Чем больше величина Π , тем длиннее факел при прочих равных условиях.

В приведенных выше формулах приняты следующие обозначения:

I_v — относительное количество движения, которое вносит в струю газа воздух на пути захвата.

$$I_v = \frac{G_v \omega_v}{G_r \omega_r} = \omega \frac{\omega_v}{\omega_r},$$

где G_v — стехиометрический расход воздуха, который необходимо вовлечь в струю для сжигания газа в количестве G_r , кг/с;

ω_v и ω_r — средние скорости при определении количества движения (см. с. 259 «Аэродинамика струи»). При приближенных расчетах, когда истекающие газ и воздух характеризуются хорошо развитой турбулентностью, можно считать, что $k_{0г.} = k_{0в.} \approx 1$;

Eu — критерий Эйлера.

$$Eu = \frac{P - P_{окр.}}{\rho_{г.} \omega_{г.}^2}.$$

Здесь $P_{окр.}$ — статическое давление в среде, куда истекает газ, $\text{H}/\text{м}^2$;

P_0 — статическое давление газа в истекающей струе в начальном сечении, $\text{H}/\text{м}^2$.

При дозвуковых скоростях истечения газа $P_0 = P_{окр.}$ и $Eu = 0$. В общем случае $P_0 \geq P_{окр.}$.

Критерий Эйлера можно определить также по формуле:

$$Eu = \frac{1}{k} \left(1 - \frac{P_{\text{окр}}}{P_{\text{кр}}} \right) = \frac{1}{k} \left(1 - \frac{G_{\text{кр}}^0}{G_0} \right);$$

Fr — критерий Фруда

$$Fr = \omega_r^2 / g d_0.$$

Значения критерия Фруда могут меняться: $Fr=0-\infty$. Чем больше критерий Фруда, тем в меньшей мере сила земного притяжения влияет на размеры факела. Длину факела, величина которой не зависит от силы земного тяготения, называют предельной и обозначают через L_0 :

$$L_0 = \frac{d_0 N_0 (1 + \omega) - \frac{1}{b_0}}{\sqrt{1 + I_B + Eu}} \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_{\text{см}}}}.$$

Написание выражения для длины факела L_Φ можно упростить, введя два комплекса: симплекс Семикина $Sn = \frac{L_\Phi}{d_0} : \frac{L_0}{d_0}$ и критерий Китаева

$$Kt = \frac{1 + I_B + Eu}{f(\omega) f_1(\rho)} \cdot \frac{Fr}{\left(\frac{L_0}{d_0} \right)^3}.$$

Тогда уравнение для расчета длины факела в обобщенном виде принимает вид

$$Sn^5 - Kt (1 - Sn^2) = 0.$$

Симплекс Семикина может меняться от 0 до 1, а критерий Китаева — в пределах $0 - \infty$. Графическое решение этого уравнения для длины факела приведено на рис. 141, из которого видно, что при $Kt \geq 20$

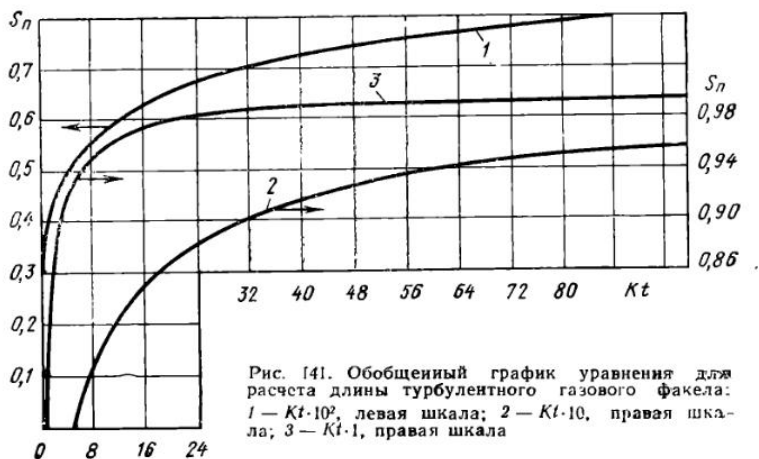


Рис. 141. Обобщенный график уравнения для расчета длины турбулентного газового факела: 1 — $Kt \cdot 10^2$, левая шкала; 2 — $Kt \cdot 10$, правая шкала; 3 — $Kt \cdot 1$, правая шкала

практически симплекс Семикина не меняется (длина факела не меняется), и можно пользоваться для определения длины факела L_Φ выражением для предельной длины факела L_0 , т. е. $L_\Phi \approx L_0$. Ошибка при такой замене составляет всего лишь $\sim 2\%$.

Если воздушный поток направлен к газовому под углом встречи δ , то длину факела необходимо умножить на поправочный коэффициент

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{1 + I_B (1 - \cos \delta)}}.$$

В том случае, когда свойства факела не зависят от действия силы земного притяжения, т. е. при значении критерия Китаева $Kt \geq 20$, и при организации турбулентного факела при внешнем перемешивании газа с воздухом в процессе горения (отсутствует предварительное перемешивание газа с воздухом) можно пользоваться более простыми зависимостями:

$$L_{\phi} \approx L_0 = \frac{\sigma \Pi d_0}{\sqrt{1 + I_B + Eu}} = \frac{0,48 \sqrt{i_{п.г}} \omega \rho_r}{\sqrt{1 + I_B + Eu}} d_0.$$

При дозвуковых скоростях истечения газа, когда $\omega_r < 0,4 \omega_{кр}$, т. е. при статическом давлении газа перед соплом до 7—8 кН/м² (700—800 мм вод. ст.), когда критерий Эйлера равен нулю ($Kt > 20$):

$$L_{\phi} = \frac{0,48 d_0 \sqrt{i_{п.г}} \omega \rho_r}{\sqrt{1 + I_B}}.$$

При отсутствии сопутствующего воздушного потока, когда весь воздух для организации факела вовлекается из окружающей атмосферы ($Kt > 20$):

$$L_{\phi} = 0,48 d_0 \sqrt{i_{п.г}} \omega \rho_r \approx r_0 \sqrt{i_{п.г}} \omega \rho_r = r_0 \Pi = \frac{\Pi}{2} d_0.$$

При отсутствии подогрева газа ($Kt > 20$)

$$L_{\phi} = r_0 \sqrt{i_{п.г}} L_{теор} \rho_{0.в}$$

или

$$L_{\phi} = 0,54 d_0 \sqrt{i_{п.г}} L_{теор} = 0,54 d_0 \sqrt{(Q_H^p + i_r + \omega i_B) L_{теор}},$$

пренебрегая энтальпией газа, считая, что $i_r = 0$, получим

$$L_{\phi} = 0,54 d_0 \sqrt{\left(Q_H^p + \frac{1,293 L_{теор}}{\rho_{0.г}} i_B\right) L_{теор}}.$$

После подстановки числового значения энтальпии воздуха при 20°C, принимая $i = 26$ кДж/кг, имеем

$$L_{\phi} = 0,54 d_0 \sqrt{\left(Q_H^p + 26 \frac{L_{теор}}{\rho_{0.г}}\right) L_{теор}}.$$

Здесь L_{ϕ} — длина факела, м;

d_0 — диаметр газового сопла, м;

Q_H^p — теплота сгорания газа, кДж/кг;

$L_{теор}$ — теоретический расход воздуха, м³/м³;

$\rho_{0.г}$ — плотность газа при нормальных условиях, кг/м³.

Б. И. Китаев и П. В. Левченко получили формулу для видимой длины свободно горящего турбулентного факела (газ холодный):

$$L_{\phi} = 14,0 K \omega_r^{0,34} d_0^{0,83},$$

где ω_r — скорость истечения газа из сопла, м/с;

d_0 — диаметр сопла, м;

K — коэффициент, зависящий от теплоты сгорания и состава горючего газа, равный

$$\frac{0,24}{4187} Q_H^p.$$

А. Л. Кюде предложено выражение на основании исследований свободно горящего факела городского газа

$$L_{\phi} = K_1 \frac{(1 + \omega_v)}{R_c} \sqrt{\frac{V_0 \rho_0}{\omega_r}} \text{ м,}$$

где ω_b — стехиометрическое число, отношение объемов воздуха и топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

K_1 — опытный коэффициент, равный 20,8;

R_c — массовое отношение среды струи к ее горючей части, кг/кг.

По данным Е. И. Казанцева и И. Д. Семикина, длина турбулентного факела различных коксо-доменных смесей может быть определена для сжигания в спокойном воздухе по формуле

$$L_{\Phi} = \frac{\omega_0}{3,75 + 0,925 \omega_r} \cdot (5,6 + 0,005 Q_H^p) d_0$$

и при сжигании в потоке воздуха, движущегося со скоростью ω_b :

$$L_{\Phi} = \frac{\omega_0}{2,4 + 0,925 \omega_r + \omega_b} (5,6 + 0,005 Q_H^p) d_0.$$

По исследованиям И. Д. Семикина, длину факела можно определить из формулы

$$L_{\Phi} = \left(1 + \frac{V_0^B \rho_0^B}{\rho_0^r} \right) \frac{11,5 d_0}{\sqrt{\frac{T_r}{273} + \frac{4}{\omega_{0,r}}} \sqrt{\frac{273}{T_r}}}.$$

По данным Е. И. Казанцева, при скорости истечения газа $\omega_r > 30$ м/с и скорости параллельно идущего воздуха $\omega_b > 5$ м/с можно пользоваться формулой

$$L_{\Phi} = \frac{L_{\Phi, \max} \omega_r}{\omega_r + \omega_b},$$

где ω_r и ω_b — действительные скорости истечения газа и воздуха.

Факел предварительно перемешанной газо-воздушной смеси

Длину турбулентного факела газо-воздушной смеси рассчитывают по формулам Аверина—Семикина (см. выше) с тем отличием, что вместо комплексного параметра Π подставляют Π_1 . Комплексный параметр Π_1 зависит от коэффициента расхода первичного воздуха α_1 :

$$\Pi_1 = \sqrt{i_{п.с} (\alpha_1 + \omega_a) \rho_{см}},$$

где $i_{п.с}$ — калориметрическое теплосодержание продуктов неполного сгорания 1 кг смеси газа с воздухом;

$$i_{п.с} = Q_H^{см} + i_{см} + \omega_a i_{см} \text{ кДж/кг};$$

$Q_H^{см}$ — теплота сгорания 1 кг газо-воздушной смеси с коэффициентом расхода первичного воздуха α_1 ;

$$Q_H^{см} = \varphi_r Q_H^p;$$

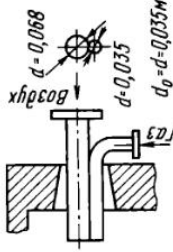
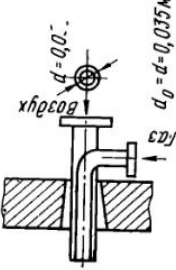
Q_H^p — теплота сгорания 1 кг чистого газа, кДж/кг;

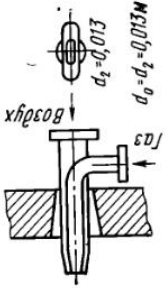
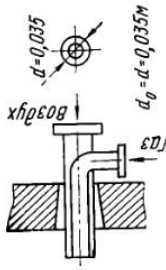
φ_r — доля массы газа в смеси с воздухом;


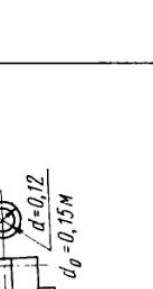
$$\varphi_r = \frac{1}{1 + \alpha_1 L_{теор}} \frac{\rho_{0r}}{\rho_{0см}};$$

Таблица XI-4

Характеристики факелов при различных условиях сжигания топлива

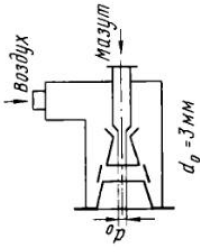
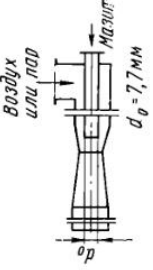
№ п.п.	Тип, конструкция и выходной диаметр (м) топливосжигающего устройства	Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха α	Выходные температуры, °С, и скорости, м/с	Среда распространения факела и ее температура	Характеристики факела	
					l_{ϕ} , м, $q_{\text{об. ф.}}$: кВт/м ³	$\frac{l_{\phi}}{d_0} \left(\frac{l_{\phi}}{d_{\text{нач}}} \right)$
1	Двухпроводная газовая горелка с рядом расположенными соплами 	Коксовый газ, $Q_p = 14820$ (3540), $\alpha = 1,01$	Топливо: $t_r = 14$; $w_r = 10,1$. Воздух: $t_b = 0$; $w_b = 10,5$	Продукты сгорания, $t_d = 800-1250^{\circ}\text{C}$	4 —	110
2	Двухпроводная газовая горелка с концентрически расположенными соплами 	То же, $\alpha = 0,98$	Температуры те же, $w_r = 10,1$; $w_b = 10,8$	Продукты сгорания, $t_d = 800-1250^{\circ}\text{C}$	2,4 60	70 —

№ п.п	Тип, конструкция и выходной диаметр (м) топливосжигающего устройства	Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха α	Выходные температуры, °С, и скорости, м/с	Среда распространения факела и ее температуры	Характеристики факела
					l_{ϕ} , м; $q_{об. \phi}$; кВт/м³ $\frac{l_{\phi}}{d_0} \left(\frac{l_{\phi}}{d_{фак}}$
3	Двухпроводная газовая горелка, но со сплюснутыми сеплами 	Коксовый газ, $\alpha = 1,01$	Температуры те же, $w_r = 25,6$; $w_b = 21,8$	Среда и температуры — те же	1,1 85
4 5 6	То же, что в п. 2, но с завихрителем на пути воздуха 	Коксовый газ: $\alpha = 0,99$; $\alpha = 1,18$; $\alpha = 1,71$	Температуры те же, $w_r = 10,1$; $w_b = 10,1$; $w_b = 12$; $w_b = 17,4$	Среда и температуры — те же	1,3 1,03 0,68 37 30 20

№ п.п.	Тип, конструкция и выходной диаметр (м) топливосжигающего устройства	Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха α	Выходные температуры, °С, и скорости, м/с	Среда распространения факела и ее температура	Характеристики факела	
					l_{ϕ} , м; $q_{об. \phi}$; кВт/м³	$\frac{l_{\phi}}{d_0} \left(\frac{l_{\phi}}{d_{нач}} \right)$
7 8 9	Турбулентная газовая горелка (двухпроводная, с внутренним перемешиванием) 	Коксовый газ, $\alpha = 0,98$; $\alpha = 1$; $\alpha = 1,18$	Температуры те же	Среда и температуры — те же	0,7 0,55 0,18	10 8 2,6
10 11	Турбулентная газовая горелка (двухпроводная, худшая, чем в пп. 7 и 9, с внутренним перемешиванием) 	Природный газ, $\alpha = 1$; $\alpha = 1,07$	Смесь: $t_{см} \approx 20$; $w_{см} = 14,9$; $w_{см} = 15,9$	Продукты сгорания, $t_{г} = 1500 - 1600^{\circ}\text{C}$	1,8 1,2	12 8

Продолжение табл. XI-4

№ п.п.	Тип, конструкция и выходной диаметр (м) топливосжигающего устройства	Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха α	Выходные температуры, °С, и скорости, м/с	Среда распространения факела и ее температура	Характеристики факела	
					l_{ϕ} , м, $q_{об. \phi}$: кВт/м ³	$\frac{l_{\phi}}{d_0} \left(\frac{l_{\phi}}{d_{нач}} \right)$
12 13	<p>Двухпроводная газовая горелка с концентрически расположенными соплами (воздух подведен тангенциально)</p>	<p>Природный газ, $\alpha = 1$ $\alpha = 1,07$</p>	<p>Топливо: $t_r = 15-20$; $w_r = 24,6$ Воздух: $t_b = 20-35$; $w_b = 14,2$; $w_b = 15,2$</p>	<p>Продукты сгорания, $t_d = 1400-1500^{\circ}\text{C}$</p>	<p>$> 2,5$ 2,5 324</p>	<p>> 70 70</p>
14	<p>Двухпроводная газовая горелка с концентрически расположенными соплами ГНП (газовое сопло с осевым отверстием), $d_{нач} = d = 0,093$ м</p>	<p>То же, $\alpha = 1,05$</p>	<p>Смесь: $t_{см} = 20$; $w_{см} = 18$</p>	<p>Продукты сгорания, $t_d = 1400-1500^{\circ}\text{C}$</p>	<p>1,77 350</p>	<p>20</p>
15	<p>Мазутная одноступенчатая форсунка низкого давления ФОБ-2</p>	<p>Мазут, $\alpha = 1,05-1,1$</p>	<p>Топливо: $t_m = 70-80$; $P = 100$ кН/м² Воздух: $t_b = 0$; $P = 7$ кН/м²; $t_b = 300^{\circ}\text{C}$; $P = 3$ кН/м²; $t_b = 0$; $P = 3$ кН/м²</p>	<p>Продукты сгорания, $t_d = 800-1000^{\circ}\text{C}$</p>	<p>0,65 0,65 1</p>	<p>520 520 800</p>
16						
17						

№ п. п.	Тип, конструкция и выходной диаметр (м) форсунок топливосжигающего устройства	Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха α	Выходные температуры, °С, и скорости, м/с	Среда распространения факела и ее температура	Характеристики факела	
					$l_{\text{ф}}$, м, $q_{\text{об. ф.}}$: кВт/м ³	$\frac{l_{\text{ф}}}{d_0} \left(\frac{l_{\text{ф}}}{d_{\text{нач}}} \right)$
18	<p>Мазутная двухступенчатая форсунка низкого давления типа ФДБ-1</p> 	<p>Мазут, $\alpha = 1,05 - 1,1$</p>	<p>Топливо: $t_{\text{м}} = 70 - 80$; $P = 100$ кН/м². Воздух: $t_{\text{в}} = 23$; $P = 7$ кН/м²; $t_{\text{в}} = 23$; $P = 3$ кН/м²</p>	<p>Продукты сгорания, $t_{\text{д}} = 800 - 1000^{\circ}\text{C}$</p>	<p>0,65 1,01</p>	<p>220 360</p>
19						
20	<p>Пневматическая форсунка высокого давления (ДМИ) с паровым или воздушным распыливанием</p> 	<p>Мазут, $Q_{\text{н}} = 39770$ (9500), $\alpha = 1,05$; $\alpha = 1,22$; $\alpha = 1,45$</p>	<p>Топливо: $t_{\text{м}} = 70 - 80$. Воздух: $t_{\text{в}} = 0$. Пар: $t_{\text{п}} = 150$. Скорость выхода распылителя 300—400</p>	<p>Продукты сгорания, $t_{\text{д}} = 1000 - 1300^{\circ}\text{C}$</p>	<p>4 3 1,85</p>	<p>520 390 240</p>
21						
22						

$\varphi_{\text{в}}$ — доля массы воздуха в газо-воздушной смеси;

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{\alpha_1 L_{\text{теор}}}{1 + \alpha_1 L_{\text{теор}}} \frac{\rho_{0\text{в}}}{\rho_{0\text{см}}};$$

$\rho_{0\text{в}}, \rho_{0\text{г}}, \rho_{0\text{см}}$ — соответственно плотности при нормальных условиях воздуха, газа, газо-воздушной смеси, кг/м³;

ω_{α} — стехиометрическое число первичной газо-воздушной смеси, если ее рассматривать как самостоятельный горючий газ (при коэффициенте расхода первичного воздуха α_1), кг/кг; $\omega_{\alpha} = \omega_{\text{г}} - \varphi_{\text{в}}$.

По данным Н. Н. Норкина, высота внутреннего конуса пламени h при факельном сжигании горючих смесей газа с первичным воздухом может быть найдена из уравнения

$$h = \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{\omega_{\text{г}}^2}{u^2} - 1} \text{ м,}$$

где d_0 — диаметр сопла, м;

u — скорость распространения пламени, м/с;

$\omega_{\text{г}}$ — скорость истечения газо-воздушной смеси, м/с.

Опытные данные

Для многих практических случаев могут оказаться полезными опытные данные по характеристике факелов существующих конструкций горелок и форсунок, приведенные в табл. XI-4.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА И НАГРЕВ ИЗДЕЛИЙ

Условные обозначения

- A — коэффициент поглощения;
 $a = \lambda / \rho c$ — коэффициент температуропроводности, м²/ч; м²/с; $L^2 T^{-1}$;
 c — теплоемкость, кДж/(кг·°С); $L^2 T^{-2} \theta^{-1}$;
 C — коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); $MT^{-3} \theta^{-4}$;
 $C_{\text{н}}$ — скорость нагрева, °С/ч; $T^{-1} \theta$;
 D — коэффициент пропускания;
 d — диаметр, м; L ;
 E — излучательная способность, Вт/м²; MT^{-3} ;
 $\exp x = e^x$ — условное написание экспоненции x ;
 E — модуль упругости, Н/м²; $L^{-1} MT^{-2}$;
 F_{ik} — расчетная (взаимная) поверхность при определении количества тепла, переданного с i -того тела на k -тое, м²; L^2 ;
 F — поверхность, м²; L^2 ;
 $Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2}$ — критерий Грассгофа;
 $Gr_{\text{ср}}$ — критерий Gr , определенный по средним величинам;
 g — ускорение свободного падения, м/с²; LT^{-2} ;
 $h = \alpha / \lambda$ — относительный коэффициент теплоотдачи, 1/м; L^{-1} ;
 i — удельная энтальпия, кДж/кг; $L^2 T^{-2}$;
 Δi — приращение энтальпии $\Delta i = i_{\text{к}} - i_{\text{н}}$, кДж/кг; $L^2 T^{-2}$;
 I — энтальпия, кДж; $L^2 MT^{-2}$;
 I — интенсивность излучения, Вт/м³; $L^{-1} MT^{-3}$;
 J_ν — модифицированные функции Бесселя I рода ν -го порядка;
 J_{μ_n} — функции Бесселя по параметру μ_n , где $n = 0, 1, 2, 3 \dots$;
 J_1 — функции Бесселя первого порядка I рода;
 J_0 — функции Бесселя нулевого порядка I рода;
 K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С); $MT^{-3} \theta^{-1}$;
 $k; k_1; k_2; k_3$ — коэффициенты, зависящие от формы тела;
 K — модифицированные функции Бесселя второго рода;
 l — длина, м; L ;
 $Nu = \alpha d / \lambda$ — критерий Нуссельта;
 $Pr = \nu / a$ — критерий Прандтля;
 $Pe = \omega l / a$ — критерий Пекле;
 P — давление, Н/м² (кгс, мм. вод. ст.); $L^{-1} MT^{-2}$;
 p — парциальное давление;
 Q — количество тепла, кДж; $L^2 MT^{-2}$;
 q — удельный тепловой поток, Вт/м²; MT^{-3} ;
 R — тепловое сопротивление, $R = \frac{s}{\lambda}$; $R = \frac{1}{\alpha}$, м²·°С/Вт;
 $M^{-1} T^3 \theta$;
 r — радиус, м; L ;
 $Re = \omega d / \nu$ — критерий Рейнольдса;
 R — коэффициент отражения;

- S, B, L, R, H — линейные размеры изделий; L ;
 s — толщина прогреваемого слоя, м; L ; эффективная длина
 луча, м; L ; толщина слоя, м; L ;
 t — температура по стоградусной шкале, °C; θ ;
 T — абсолютная температура, К; θ ;
 $\Delta t = t_1 - t_2$ — разность температур, °C; θ ;
 V — объем, м³; L^3 ;
 w — скорость потока жидкости, м/с; LT^{-1} ;
 Y — функции Бесселя II рода;
 $\alpha_{\text{к}}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°C);
 $MT^{-3} \theta^{-1}$;
 $\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·°C);
 $MT^{-3} \theta^{-1}$;
 $\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$ — коэффициент теплоотдачи суммарный, Вт/(м²·°C);
 $MT^{-3} \theta^{-1}$;
 β — коэффициент линейного (для газов объемного) расши-
 рения, 1/°C; θ^{-1} ;
 δ — толщина, линейный размер, м; L ;
 ε — степень черноты, относительный коэффициент излуче-
 ния;
 ε_0 — степень черноты абсолютно черного тела;
 $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ — степень черноты углекислоты;
 $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ — степень черноты водяных паров;
 $\Delta \varepsilon_{\text{д}}$ — поправочный коэффициент на совместное излучение H₂O
 и CO₂;
 $\eta_{\text{г}}$ — коэффициент эффективности газового излучения;
 η_l — корни трансцендентного уравнения, $l=0, 1, 2, 3, \dots$;
 θ — скорость подъема температуры печи, °C/ч; $T^{-1}\theta$;
 ϑ — безразмерная температура;
 λ — коэффициент теплопроводности Вт/(м·°C); $LMT^{-3}\theta^{-1}$;
 λ — длина волны, м, мм, мкм, нм; L ;
 μ — коэффициент вязкости, Н·с/м²; $L^{-1}MT^{-1}$;
 ν — кинематическая вязкость, м²/ч; м²/с; L^2T^{-1} ;
 ν — пуассоновое отношение; $\psi/\delta = \nu$, ψ — относительное
 сжатие; δ — относительное удлинение поперечного сече-
 ния образца. Для стали $\nu=0,3$;
 ρ — плотность, кг/м³; $L^{-3}M$;
 σ_0 — константа излучения, равная $(5,6687 \pm 0,010) \cdot 10^{-9}$
 Вт/(м²·°C); $MT^{-3}\theta^{-1}$;
 σ — напряжение, Н/м²; $L^{-1}MT^{-2}$;
 τ — время, ч, с; T ;
 φ_{ik} — угловой коэффициент с i -того тела на k -тое (коэффици-
 ент облученности);
 φ ; ψ ; F ; f ; Φ — обозначения функций;

Индексы

- k — параметры кладки при расчете теплообмена между се-
 рыми телами; конечная температура изделия;
 m — максимальное значение температуры;
 m — параметры металла;
 n — начальная температура изделия;
 p — параметры печи;
 пов — температуры поверхности изделия;
 ср — средняя температура по сечению изделия;
 $ц$ — температуры на оси изделия;
 \prime — параметры инерционного периода нагрева;

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПОСРЕДСТВОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Теплопередача через плоскую многослойную стенку

Количество тепла, переданного через n -слойную стенку, Q кДж, удельный тепловой поток q Вт/м², температуру между слоями t определяют по следующим формулам:

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha'}} F \tau =$$

$$= \frac{t_1 - t_{n+1}}{R + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R'} F \tau = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R + \sum R_i + R'} F \tau;$$

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R + \sum R_i + R'};$$

$$t_x = t_1 - \frac{Q}{F \tau} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_{x-1}}{\lambda_{x-1}} \right);$$

$$q = \frac{Q}{F \tau}; \quad R = \frac{s}{\lambda} \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

Теплопередача через цилиндрическую стенку

Для однослойной цилиндрической стенки основные расчетные формулы имеют следующий вид.
Тепловой поток через 1 м:

$$q = \frac{2 \pi \lambda (t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ Вт/м;}$$

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha \pi d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha' \pi d_2}} \text{ Вт/м;}$$

текущая температура

$$t = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1} \text{ °C; } t = t_1 - \frac{q}{2 \pi \lambda} \ln \frac{r}{r_1};$$

$$t = t_1 - q \left(\frac{1}{\alpha \pi d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda} \ln \frac{d}{d_1} \right).$$

Для многослойной цилиндрической стенки справедливы следующие зависимости:

$$Q = \frac{2,727 (t_1 - t_{n+1}) l \tau}{\frac{1}{\lambda_1} \lg \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \lg \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \lg \frac{d_{n+1}}{d_n}};$$

$$t_n = t_1 - \frac{Q}{2,727 l \cdot \tau} (R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1});$$

$$Q = \frac{(t_1 - t_{n+1}) l \tau}{\frac{1}{\alpha \pi d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{2 \pi \lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} + \frac{1}{\alpha' \pi d_n}};$$

$$t_n = t_1 - \frac{Q}{l \tau} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{\alpha \pi d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{2 \pi \lambda_{n-1}} \ln \frac{d_n}{d_{n-1}} \right).$$

Для однослойной цилиндрической трубы потери тепла с 1 м возрастают с увеличением диаметра d до $d_{\text{опт}}$, после чего начинается снижение потерь тепла. Оптимальный диаметр трубопровода $d_{\text{опт}} = \frac{2\lambda}{\alpha'}$. Для стальной трубы $d_{\text{опт}} = 8350$ мм; для трубы, покрытой асбестовой массой, $d_{\text{опт}} = 25$ мм; для бетонной трубы $d_{\text{опт}} = 167$ мм (значения $d_{\text{опт}}$ даны для $\alpha' = 14$ Вт/(м²·°С).

Теплопередача через оребренную поверхность

Оребрение поверхности (например, трубы игольчатых рекуператоров) повышает количество передаваемого тепла. Оребрение рекомендуется производить на стороне с более низким коэффициентом теплоотдачи. Количество тепла определяется по формуле

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s}{\lambda} + \frac{F}{F_p} \frac{1}{\alpha'}} F \tau \text{ кДж,}$$

где F — поверхность трубы, м²;

F_p — поверхность оребренной трубы.

ТЕПЛОТДАЧА КОНВЕКЦИЕЙ

Теплоотдача при свободной конвекции

Процесс теплообмена при свободном движении жидкости, обусловленном разностью плотностей нагретых и холодных элементарных объемов называются свободной конвекцией. При расположении нагреваемого или охлаждаемого тела в неограниченном объеме расчетные формулы имеют вид: $Nu = C(Pr \cdot Gr)^n$

1) при $10^{-3} < Pr \cdot Gr < 5 \cdot 10^2$

$$\alpha_k = A_1 \left(\frac{\Delta t}{l^3} \right)^{1/8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С); } C = 1,18; \quad n = 1/8;$$

2) при $5 \cdot 10^2 < Pr \cdot Gr < 2 \cdot 10^7$

$$\alpha_k = A_2 \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{1/4} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С); } C = 0,54; \quad n = 1/4;$$

3) при $Pr \cdot Gr > 2 \cdot 10^7$ $\alpha_k = A_3 \Delta t^{1/3} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С); } C = 0,135; \quad n = \frac{1}{3};$

4) при $Pr \cdot Gr < 10^{-3}$ $Nu = 0,45$.

Значения коэффициентов A приведены в табл. XII-1.

Приведенные формулы справедливы для любых жидкостей и тел любых размеров и формы. Если теплоотдающая поверхность обращена кверху, то α_k увеличивается на 30%, если книзу — уменьшается на 30%.

Таблица XII-1

Значения коэффициентов A в формуле для определения теплообмена при свободной конвекции в неограниченном пространстве для воздуха и воды при различной температуре

Для воздуха

Коэффициенты	Температура, °C									
	-50	-20	0	20	50	100	200	300	500	1000
A_1	0,279	—	0,291	—	0,302	0,310	0,337	0,349	0,372	0,407
A_2	1,50	1,44	1,42	1,36	1,32	1,27	1,22	1,10	1,00	0,815
A_3	1,94	1,83	1,69	1,57	1,48	1,33	1,13	1,00	0,815	0,558

Для воды

Коэффициенты	0	20	40	60	80	100	150	200
A_1	9,30	13,15	15,7	17,65	19,0	20,0	21,8	22,6
A_2	69,8	111,6	149	178	204	227	274	305
A_3	102,5	198	291	363	425	481	607	714

Физические характеристики относятся к средней температуре между жидкостью и стенкой:

$$t_{cp} = \frac{1}{2} (t_{ст} + t_{ж}).$$

За линейный размер l принимают: для шара и горизонтальной трубы — диаметр, для вертикально расположенной трубы или пластины — высоту участка теплообмена, для горизонтальной плиты — меньшую сторону плиты.

Процесс теплообмена в замкнутом ограниченном непроточном объеме рассчитывают по формулам для твердой стенки с введением вместо коэффициента теплопроводности эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эkv} = \varepsilon \cdot \lambda$, где λ — коэффициент теплопроводности среды, заполняющей прослойку при средней температуре; ε — коэффициент, учитывающий влияние конвекции. В приближенных расчетах для значений $(Gr \cdot Pr)_{cp} > 10^3$ можно применять следующую зависимость:

$$\varepsilon = 0,18 (Gr \cdot Pr)_{cp}^{0,25} = A \delta \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{\delta}},$$

где

$$A = 0,18 \frac{(\beta \cdot g \cdot Pr)^{0,25}}{\sqrt{0,5}};$$

δ — толщина прослойки, м;

Δt — разность температур горячей $t_{ст1}$ и холодной $t_{ст2}$ поверхностей.

При вычислении критериев за определяющую температуру принята средняя температура $t_{cp} = 0,5(t_{ст1} + t_{ст2})$.

Если при расчете получается, что $\varepsilon < 1$, то это означает, что $Gr \cdot Pr < 10^3$, и, следовательно, $\varepsilon = 1$.

Для учета теплоотдачи излучением между стенками прослойки в величину эквивалентного коэффициента теплопроводности вводится дополнительный член $\alpha_{л}$ — приведенный коэффициент теплоотдачи излучением $\lambda_{эkv} = \varepsilon \lambda + \alpha_{л} \delta$.

Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

Коэффициент теплоотдачи в канале с постоянной температурой стенки при ламинарном течении жидкости с неизменными физическими свойствами можно определять из следующих выражений:

$$а) \text{ для круглой трубы (канала) при } Pe \frac{d}{L} > 12 \quad Nu = 1,61 \left(Pe \frac{d}{L} \right)^{1/3};$$

$$\text{при } Pe \frac{d}{L} < 12 \quad Nu = 3,66;$$

$$б) \text{ для плоской щели при } Pe \frac{2\delta}{L} > 70 \quad Nu = 1,85 \left(Pe \frac{2\delta}{L} \right)^{1/3}; \quad \text{при } Pe \frac{2\delta}{L} \leq 70 \quad Nu = 7,60.$$

Для прямых гладких труб коэффициент теплоотдачи при турбулентном режиме следует определять по следующей зависимости:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25},$$

где $Pr_{ст}$ — определяется по температуре стенки, остальные значения критериев — по средней температуре жидкости и $d_{гидр}$.

Формула применима к трубам любой формы поперечного сечения — круглого, квадратного, прямоугольного, треугольного, кольцевого ($d_2/d_1 = 1 \div 5,6$), щелевого ($a/b = 1 \div 40$) и др., для всех упругих и капельных жидкостей при $Re = 10 \div 5 \cdot 10^6$ и $Pr = 0,6 \div 2500$.

Так как для газов $Pr \approx const$, то формула упрощается и для воздуха имеет вид

$$Nu = 0,018 Re^{0,8}.$$

Приведенные формулы строго справедливы для $l/d > 50$. Для коротких труб при $l/d < 50$ значение коэффициента теплоотдачи α_k надо умножать на поправочный коэффициент ϵ_l из табл. XII-2.

Таблица XII-2

Значение поправочного коэффициента ϵ_l при отношениях l/d

Re	l/d								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
1 · 10 ⁴	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1,00
2 · 10 ⁴	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,00
5 · 10 ⁴	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1,00
1 · 10 ⁶	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,00
1 · 10 ⁸	1,14	1,10	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,00

Расчет теплоотдачи в изогнутых трубах проводится по формулам для прямой трубы с последующим введением поправочного коэффициента ϵ_R , для змеевиковых труб он определяется из выражения

$$\epsilon_R = 1 + 1,77 \frac{d}{R},$$

где R — радиус змеевика;
 d — диаметр трубы.

Расчетные формулы теплоотдачи для пакета труб, омываемых любой жидкостью при $Re = 2 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^5$, имеют следующий вид: при коридорном расположении труб в пучке

$$Nu = 0,23 Re^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25};$$

при шахматном расположении труб в пучке

$$Nu = 0,41 \cdot Re^{0,60} \cdot Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

По этим формулам расчет ведется на среднюю температуру жидкости, скорость в самом узком сечении ряда и диаметр труб.

Теплоотдача практически не зависит от относительного расстояния между трубами как по ширине, так и по глубине пучка.

Приведенные формулы для воздуха принимают следующий вид:

при коридорном расположении труб

$$Nu = 0,21 Re^{0,65};$$

при шахматном расположении труб

$$Nu = 0,37 Re^{0,60}$$

В промышленных теплообменниках вследствие загрязнения поверхности нагрева коэффициент теплоотдачи получается в среднем на 20% ниже и может быть определен по формулам:

при коридорном расположении труб

$$Nu = 0,18 Re^{0,64};$$

при шахматном расположении труб

$$Nu = 0,29 Re^{0,60}$$

Приведенные формулы позволяют определить среднее значение коэффициента теплоотдачи α_k для трубок третьего и всех последующих рядов в пучках. Для первого ряда труб α_k составляет 60%; для второго ряда коридорного расположения 90% и для второго ряда шахматного расположения 70% значения, полученного по приведенным выше формулам.

Коэффициент теплоотдачи в решетке регенератора определяют по формулам:

для насадки в клетку

$$\alpha_k = 1,62 \frac{W^{0,5}}{d^{0,33}} T^{0,25};$$

для насадки сплошными каналами

$$\alpha_k = 0,86 \frac{W^{0,5}}{d^{0,33}} T^{0,25}$$

Кривые, построенные по этим формулам, представлены на рис. 142. При турбулентном режиме движения жидкости в области автомодельности, т. е. при $Re > 10^4$, теплоотдача от плиты описывается формулой

$$Nu = 0,032 Re^{0,8}$$

Для воды при вынужденном турбулентном движении коэффициент теплоотдачи конвекцией может быть подсчитан по выражению

$$\alpha = A \frac{W^{0,8}}{d^{0,2}}$$

Множитель A для воды имеет следующие значения.

Средняя температура охлаждающей воды $t_{ср}, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100	150	200
Коэффициент A	1430	1880	2325	2710	3070	3240	4080	4610

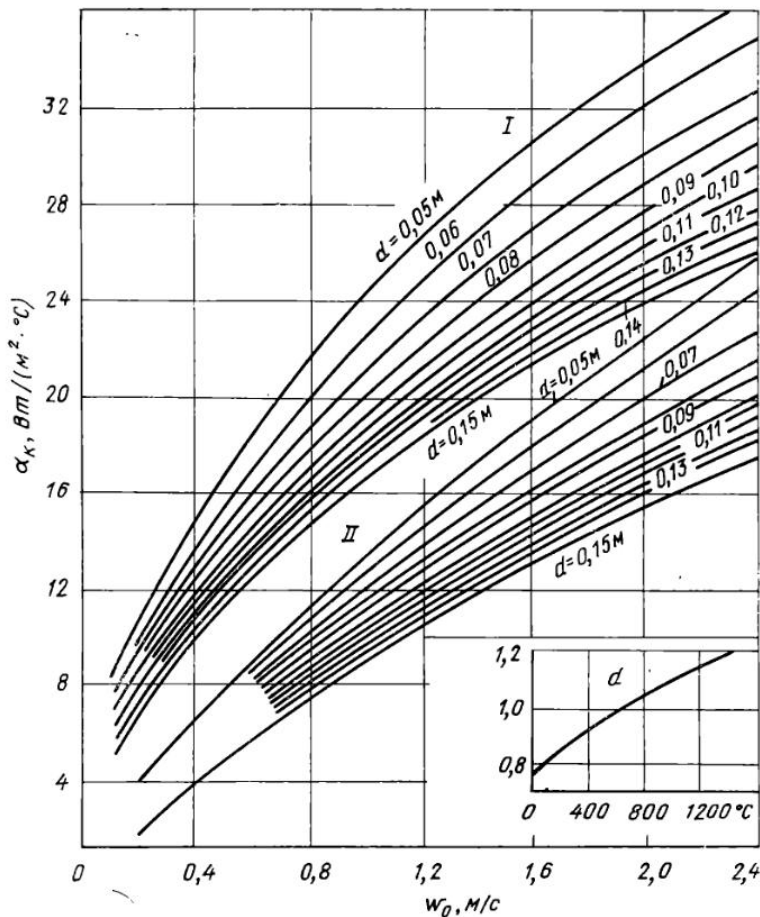


Рис. 142. Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k в решетках регенераторов:

I — насадка в клетку; *II* — насадка сплошными каналами; α — поправочный коэффициент на температуру; w_0 — скорость газа при 0°C

Расчетные формулы по теплообмену в засыпках из всевозможных металлических, угольных и других частиц самых различных размеров имеют следующий вид:

$$\text{при } 20 < Re < 200 \quad Nu = 0,106 Re;$$

$$\text{при } Re > 200 \quad Nu = 0,61 Re^{0,67}.$$

Критерии определяют следующим образом:

$$Nu = \frac{\alpha \sqrt{F}}{\lambda}; \quad Re = \frac{Z \sqrt{F}}{\eta},$$

где F — площадь всей поверхности данного элемента насадки или засыпки, м^2 ;

Z — скорость газа или жидкости (по массе), протекающих через слой, отнесенная к полной площади поперечного сечения слоя, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

η — коэффициент вязкости, $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$.

Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния

Коэффициент теплоотдачи при пузырьчатом кипении воды в большом объеме в условиях естественной конвекции для давлений от 0,2 до 10 МН/м² можно определять по следующей формуле:

$$\alpha_k = 45,4 \Delta t^{2,33} \cdot P^{0,5},$$

где $\Delta t = t_{ст} - t_s$ — разность между температурой стенки и температурой насыщения пара при данном P .

Ориентировочные пределы значений коэффициента теплоотдачи конвекцией α_k

Среда	α_k , Вт/(м ² ·°С)
При нагревании и охлаждении воздуха	1—60
При нагревании и охлаждении перегретого пара	20—100
При нагревании и охлаждении масел	60—1800
При нагревании и охлаждении воды	200—10000
При кипении воды	6000—50000
При пленочной конденсации водяных паров	5000—18000
При капельной конденсации водяных паров	50000—140000
При конденсации органических паров	600—2000

Если температура поверхности теплообмена ниже температуры насыщения, на поверхности конденсируется пар. В противном случае происходит испарение жидкости. В этих случаях теплообмена определение коэффициента теплоотдачи представляет некоторую сложность. Ориентировочные данные, пригодные для расчетов в газопечной теплотехнике, приведены на рис. 143 и 144 и на с. 284. Конденсация паров носит пленочный характер, если конденсат смачивает поверхность теплообмена. Если

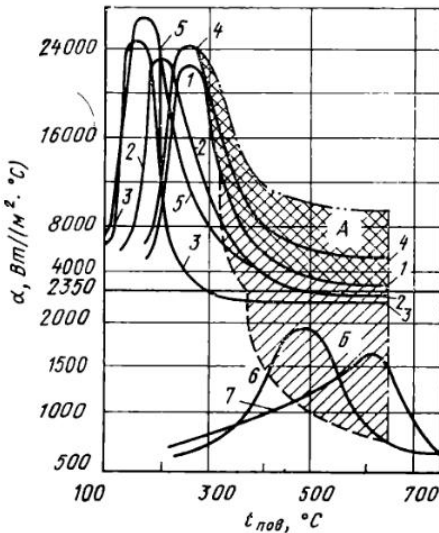


Рис. 143. Коэффициент теплоотдачи α при охлаждении металла (t — температура поверхности) в воде и масле: 1 — вода при 20°С; 2 — то же, при 60°С; 3 — то же, при 100°С; 4 — то же, при 20°С, циркулирующая со скоростью 0,25 м/с; 5 — то же, при 0°С; 6 — масло легкое; 7 — масло тяжелое; А — водные растворы солей и щелочей; Б — водно-масляные эмульсии

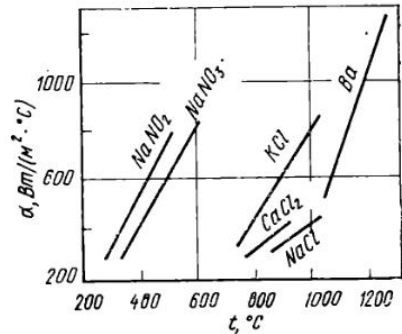


Рис. 144. Коэффициент теплоотдачи α при нагреве стали в расплавленных солях и селитре

же конденсат не смачивает поверхности, конденсация оказывается капельной. На технических поверхностях при конденсации чистого водяного пара обычно наблюдается пленочная конденсация.

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ

Основные понятия и законы

Носителем лучистой энергии являются электромагнитные колебания с длиной волны λ от долей микрометра до многих километров. Длина волны колебаний определяется из соотношения

$$c = \nu \cdot \lambda,$$

где c — скорость распространения колебаний (в пустоте $c = 2,99776 \times 10^8$ км/с);

ν — число колебаний в 1 с.

Основное количество тепловой энергии при температурах печей переносится электромагнитными колебаниями с длинами волн 0,6—50 мкм.

За единицу лучистой энергии принимают количество ее, эквивалентное 1 Дж. Энергия Q , излучаемая телом в единицу времени, выражается в ваттах. Количество энергии, излучаемое единицей поверхности в единицу времени, называется излучательной или лучеиспускательной способностью тела и обозначается буквой E . Следовательно, $E = \frac{Q}{F}$ Вт/м²;

$E = q$ — тепловому потоку излучением.

Интенсивность излучения представляет собой энергию, излучаемую телом в диапазоне длин от λ до $\lambda + d\lambda$, отнесенную к рассматриваемому интервалу длин волн $d\lambda$, $I_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$ Вт/(м²·мкм) или Вт/м³.

Лучеиспускание свойственно всем телам, и каждое из них излучает энергию непрерывно. Лучистая энергия распространяется в лучепрозрачной среде и пустоте. Попадая на поверхность другого тела или в лучепоглощающую среду, лучистая энергия поглощается, отражается и проходит полностью или частично в зависимости от свойств тела, характеризуемых коэффициентами поглощательной способности тела A , отражательной способности R и способности пропускать лучистую энергию D . $A + R + D = 1$.

В зависимости от свойств различают:

а) абсолютно черное тело, которое способно поглощать лучи всевозможной длины от 0 до ∞ и поглощает их на 100%, $A = 1$; $R = 0$; $D = 0$;

б) абсолютно белое тело, способное отражать всю падающую на него лучистую энергию, $A = 0$; $R = 1$; $D = 0$; если отражение происходит правильно, то тело называют зеркальным;

в) прозрачное тело, способное пропускать сквозь себя всю падающую на него лучистую энергию, $A = 0$; $R = 0$; $D = 1$;

г) серое тело, способное поглощать волны всевозможной длины от 0 до ∞ ; поглощение неполное, $< 100\%$, и степень поглощения лучей различной длины волны одинакова. Непоглощенные лучи серое тело отражает. Серые тела различаются способностью поглощения лучистой энергии, степенью черноты ϵ (относительным коэффициентом излучения);

д) цветное тело или селективное обладает способностью поглощать и отражать лучи различной длины волны по-разному;

е) тело с монохроматической лучеиспускательной способностью излучает лучи в узком диапазоне длин волн.

Всякое тело излучает энергию и в то же время отражает лучи, падающие на него от излучения окружающих тел. Фактически мы измеряем приборами и ощущаем суммарное, а не собственное излучение тела. Это фактическое излучение тела, состоящее из собственного и отраженного излучения, называется эффективным излучением. Так как падающее из-

лучение определяется температурой и свойствами окружающих тел, то физические качества собственного и отраженного излучения не одинаковы, их спектры различны. Однако для тепловых расчетов это различие не имеет значения, поскольку в теплопередаче рассматривается лишь энергетическая сторона процесса.

Закон Кирхгофа. Отношение лучеиспускающей способности к поглощательной для всех тел одинаково, равно лучеиспускающей способности абсолютно черного тела при той же температуре и зависит только от температуры:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \dots = \frac{E_0}{A_0} = E_0 = f(T);$$

$$\frac{C_1}{A_1} = \frac{C_2}{A_2} = \frac{C_3}{A_3} = \dots = C_0.$$

Для серых тел коэффициент A численно равен отношению $A = \frac{E}{E_0} = \epsilon$, называемому степенью черноты тела. Значения ϵ для различных тел приведены в табл. XII-3, а значения степени черноты физических тел в лучах длиной волны 0,65 мкм — в табл. XII-4.

Таблица XII-3

Степень черноты ϵ полного излучения различных материалов

Материал и характер поверхности	Температура, °C	ϵ
<i>Чистые и окисленные металлы</i>		
Алюминий:		
полированный	225—575	0,039—0,057
шероховатый	26	0,055
окисленный при 600°C	200—600	0,11—0,19
Покрытая алюминием поверхность:		
меди при нагреве до 600°C	200—600	0,18—0,19
стали при нагреве до 600°C	200—600	0,52—0,57
Вольфрам		
Вольфрамовая нить	230—2230	0,053—0,31
Вольфрамовая нить, бывшая в употреблении	3300	0,39
Железо:	25—3300	0,032—0,35
электродное, тщательно полированное	175—225	0,052—0,064
сварочное, тщательно полированное	40—250	0,28
полированное	425—1020	0,144—0,377
свежеобработанное наждаком	20	0,242
окисленное гладкое	125—525	0,78—0,82
литое необработанное	925—1115	0,87—0,95
Стальное литье полированное	770—1040	0,52—0,56
Сталь:		
листовая шлифованная	940—1110	0,52—0,61
окисленная при 600°C	200—600	0,79—0,69
листовая с плотным блестящим слоем окиси	25	0,82
окисленная шероховатая	40—370	0,94—0,97
мягкая расплавленная	1600—1800	0,28
Чугун:		
полированный	200	0,21
обточенный	830—990	0,60—0,70
окисленный при 600°C	200—600	0,64—0,78
шероховатый, сильно окисленный	40—250	0,95
расплавленный	1300—1400	0,29
Золото, тщательно полированное	225—625	0,018—0,035
Латунь тщательно полированная состава, % (вес.):		
73,2% Cu, 26,7% Zn	245—355	0,028—0,031
62,4% Cu, 36,8% Zn, 0,4% Pb, 0,3% Al	255—375	0,039—0,037
82,9% Cu, 17,0% Zn	275	0,030

Материал и характер поверхности	Температура, °С	ϵ
прокатанная с естественной поверхностью	22	0,06
прокатанная, тертая грубым наджаком	22	0,20
тусклая	50—350	0,22
окисленная при нагреве до 600°C	200—600	0,61—0,59
Медь:		
тщательно полированная электролитная	80	0,018
полированная	115	0,023
шабренная до блеска, но не зеркальная	22	0,072
окисленная при нагреве до 600°C	200—600	0,57—0,55
продолжительно нагревавшаяся, покрытая толстым слоем окиси	25	0,78
расплавленная	1075—1275	0,11—0,13
Молибденовая нить	725—2600	0,096—0,292
Никель:		
нанесенный гальваническим способом на полированное железо и затем полированный	23	0,045
технически чистый полированный	225—375	0,07—0,087
окисленный при нагреве до 600°C	200—600	0,11
Никелевая проволока	185—1000	0,096—0,186
Хромоникель	52—1035	0,64—0,76
Олово, блестящее луженое листовое железо	25	0,043—0,064
Платина чистая полированная	225—625	0,054—0,104
Платиновая лента	925—1115	0,12—0,17
Платиновая нить	25—1230	0,036—0,192
Платиновая проволока	225—1375	0,073—0,182
Ртуть очень чистая	0—100	0,09—0,12
Свинец:		
чистый неоокисленный	125—225	0,057—0,075
серный окисленный	24	0,281
окисленный при 200°C	200	0,63
Серебро:		
полированное чистое	225—625	0,0198—0,0324
полированное	38—370	0,0221—0,0312
Хром	38—538	0,08—0,26
Цинк:		
торговый (99,1%) полированный	225—325	0,045—0,053
окисленный при нагреве до 400°C	400	0,11
Оцинкованное листовое железо:		
очень блестящее	28	0,228
серое окисленное	24	0,276
<i>Огнеупорные, строительные, термоизоляционные и другие материалы</i>		
Асбестовый картон	24	0,96
Асбестовая бумага	40—370	0,93—0,95
Асбошифер	20	0,96
Динасовый кирпич:		
неглазурованный шероховатый	1000	0,8
глазурованный шероховатый	1100	0,85
Кирпич:		
шамотный глазурованный	1100	0,75
магнезитовый (80% MgO, 9% Al ₂ O ₃)	1500	0,39
силикатный (95% SiO ₂)	1230	0,66
силлиманитовый (33% SiO ₂ , 64% Al ₂ O ₃)	1500	0,29
красный шероховатый	20	0,93
шамот (55% SiO ₂ , 41% Al ₂ O ₃)	1230	0,59
Фарфор глазурованный	22	0,92
Гипс	20	0,8—0,9
Штукатурка шероховатая известковая	10—90	0,91
Мрамор сероватый полированный	22	0,93
Кварц плавленный шероховатый	20	0,93
Стекло гладкое	22	0,94
Бумага	20	0,8—0,9

Материал и характер поверхности	Температура, °С	ϵ
Вода	0—100	0,95—0,96
Дерево строганое	20	0,8—0,9
Ламповая сажа, слой 0,075 мм	40—370	0,95
Обмазка из жидкого стекла с ламповой сажой	100—225	0,96—0,95
Резина:		
твердая лощеная	23	0,95
мягкая серая шероховатая	24	0,86
Толь кровельный	20	0,93
Уголь очищенный (0,9% золы)	125—625	0,81—0,79
Угольная нить	1040—1405	0,53
Эмаль белая, припавленная к железу	19	0,9
Лак:		
белый эмалевый на железной шероховатой пластине	23	0,91
черный блестящий, распыленный по железу	25	0,88
черный матовый	40—95	0,96—0,98
белый	40—95	0,80—0,95
Шеллак:		
черный блестящий на луженом железе	21	0,82
черный матовый	75—145	0,91
Масляные краски различных цветов	100	0,96—0,86
Алюминиевые краски:		
разной давности с переменным содержанием Al	100	0,27—0,67
после нагрева до 325°C	150—315	0,35
Алюминиевый лак по шероховатой пластине	20	0,39

Примечания: 1. Степени черноты, приведенные в таблице, получены путем измерения яркости излучения в направлении нормали к поверхности тела.

2. Две температуры и две степени черноты, указанные для некоторых материалов, означают, что первая степень черноты относится к первой температуре, а вторая — ко второй, причем допускается линейная интерполяция.

Таблица XII-4

Степень черноты физических тел в лучах длиной волны 0,65 мкм

Материал и характер поверхности	Температура, °С	$\epsilon=0,65 \text{ мкм}$	Материал и характер поверхности	Температура, °С	$\epsilon=0,65 \text{ мкм}$
Серебро	—	0,07	Железо:		
Золото:			неокисленное	3000	0,41
твердое	—	0,13	жидкое	—	0,37
жидкое	—	0,22		—	0,40
Медь:			окисленное	800	0,98
твердая неокисленная	—	0,11		1000	0,95
жидкая неокисленная	—	0,15		1200	0,92
Платина:				850—1100	0,80
твердая	—	0,33	Окисленная специальная сталь	800—1100	0,80
жидкая	—	0,38	Углеродистая неокисленная сталь в атмосфере водорода	850—1100	0,44
Палладий:			Окисленный никель	800	0,96
твердый	—	0,33		1300	0,85
жидкий	—	0,37	Окисленная медь	—	0,70
Никель твердый и жидкий неокисленный	—	0,36	Окисленный нихром	600	0,95
Иридий и родий	—	0,30	То же	900	0,90
Тантал неокисленный	1100	0,60	» »	1200	0,80
Вольфрам неокисленный	1000	0,46	Жидкий чугун, светлые места (окислы)	1100—1300	0,9—0,95
То же	2000	0,43	То же	—	0,7

Материал и характер поверхности	Температура, °C	$\epsilon=0,65$ мкм	Материал и характер поверхности	Температура, °C	$\epsilon=0,65$ мкм
Жидкий чугун, темные пятна (свободные от окислов)	>1375	0,4	Свинцовая ванна: шлаки	900	1,0
Жидкая окисленная нержавеющая хромовая и хромоникелевая сталь	—	0,7—0,75	чистое зеркало	—	0,5—0,6
Жидкая окисленная хромоникелевая сталь	—	0,9	Соляная ванна	700—1400	0,8
Жидкие шлаки	—	0,65	Графит в порошке	—	0,95
То же	1300	0,9—1,0;	Уголь	—	0,85
	1300—1500	0,9	Окись алюминия — гладкопрессованный порошок	—	0,14
			Фарфор	—	0,25—0,50
			Шамот	—	0,7—0,8
			Карборунд	—	0,8

Закон Планка. Изменения интенсивности излучения (или распределения энергии) по длинам волн для абсолютно черного тела ($I_{0\lambda}$) описываются выражением

$$I_{0\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{м)},$$

где λ — длина волны, м;

T — абсолютная температура, К;

e — основание натуральных логарифмов;

C_1 — постоянная, равная $3,69 \cdot 10^{-16}$ Вт/м⁶;

C_2 — постоянная, равная $1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Зависимость интенсивности излучения абсолютно черного тела от температуры и длины волны показана на рис. 145.

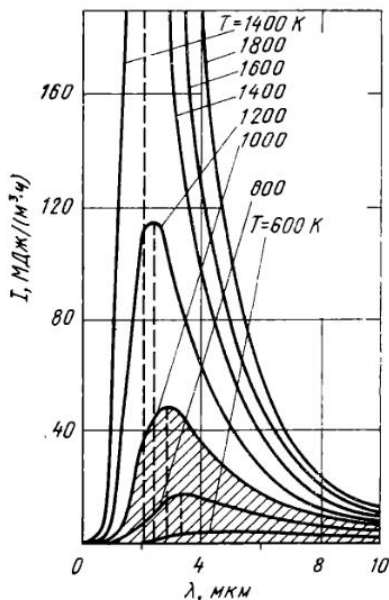


Рис. 145. Зависимость интенсивности излучения I абсолютно черного тела от длины волны λ и температуры t

10 Зак. 583

Закон Стефана—Больцмана гласит, что энергия излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$E_0 = \int_0^{\infty} I_{0\lambda} d\lambda = \sigma_0 T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ Вт/м}^2.$$

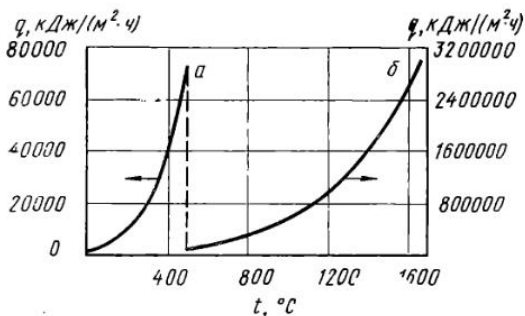


Рис. 146. Изучение абсолютно черного тела. Пользуются:

a — левой шкалой; b — правой шкалой

Здесь σ_0 — константа излучения абсолютно черного тела, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) и C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела $C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴).

График изменения $E_0 = f(T)$ представлен на рис. 146; числовые значения приведены в табл. XII-5.

Т а б л и ц а XII-5

Значения $\left(\frac{T}{100}\right)^3$, $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ и $5,67 \left(\frac{T}{100}\right)^4$ при различных температурах

Темпе- ратура, °С	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times$ $\times \left(\frac{T}{100}\right)^4$	Темпе- ратура, °С	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times$ $\times \left(\frac{T}{100}\right)^4$
0	273	20,356	55,572	315,02	505	778	470,91	3663,7	20768,4
10	283	22,665	64,142	363,60	510	783	480,05	3758,8	21307,5
20	293	25,154	73,701	417,79	515	788	489,30	3855,6	21856,2
30	303	27,818	84,289	477,81	520	793	498,68	3954,5	22416,9
40	313	30,665	95,981	544,09	525	798	508,17	4055,2	22987,7
50	323	33,699	108,85	617,04	530	803	517,78	4157,8	23569,3
60	333	36,924	122,96	697,02	535	808	527,51	4262,3	24161,7
70	343	40,354	138,41	784,60	540	813	537,37	4368,8	24765,4
80	353	43,984	155,26	880,12	545	818	547,34	4477,2	25379,9
90	363	47,843	173,67	984,48	550	823	557,43	4587,6	26005,7
100	373	51,884	193,53	1097,06	555	828	567,66	4700,2	26644,0
110	383	56,182	215,18	1219,79	560	833	578,01	4814,8	27293,7
120	393	60,698	238,54	1352,21	565	838	588,48	4931,5	27955,2
130	403	65,451	263,77	1495,23	570	843	599,08	5050,2	28628,4
140	413	70,617	291,64	1653,22	575	848	609,80	5171,1	29313,4
150	423	75,687	320,16	1814,89	580	853	620,65	5294,1	30010,7
160	433	81,180	351,51	1992,60	585	858	631,63	5419,4	30721,0
170	443	86,940	385,14	2183,24	590	863	642,74	5546,8	31443,1
180	453	92,960	421,11	2387,15	595	868	653,97	5676,5	32178,4
190	463	99,253	459,54	2604,99	600	873	665,34	5808,4	32926,1
200	473	105,82	500,53	2837,35	605	878	676,84	5942,7	33687,4
210	483	112,68	544,24	3085,13	610	883	688,47	6079,2	34461,2
220	493	119,82	590,71	3348,56	615	888	700,23	6218,0	35248,0
230	503	127,26	640,12	3629,65	620	893	712,12	6359,2	36048,4
240	513	135,01	692,60	3926,14	625	898	724,15	6502,9	36863,0
250	523	143,06	748,20	4241,32	630	903	736,31	6648,8	37690,1
260	533	151,42	807,07	4575,04	635	908	748,61	6797,3	38531,9
270	543	160,10	869,34	4928,03	640	913	761,05	6948,4	39388,4
280	553	169,11	935,18	5301,25	645	918	773,62	7101,8	40258,0
290	563	178,45	1004,7	5695,3	650	923	786,33	7257,8	41142,3
300	573	188,13	1078,0	6110,9	655	928	799,18	7416,4	42041,3
310	583	198,16	1155,3	6549,0	660	933	812,17	7577,5	42954,6
320	593	208,53	1236,6	7009,9	665	938	825,29	7741,2	43882,5
330	603	219,26	1322,1	7494,6	670	943	838,56	7907,6	44825,8
340	613	230,35	1412,0	8004,2	675	948	851,97	8076,7	45784,4
350	623	241,80	1506,4	8539,3	680	953	865,52	8248,4	46757,7
360	633	253,64	1605,5	9101,1	685	958	879,22	8422,9	47746,9
370	643	265,85	1709,4	9690,1	690	963	893,06	8600,1	48751,4
380	653	278,44	1818,2	10306,8	695	968	907,04	8780,1	49771,8
390	663	291,45	1932,3	10956,5	700	973	921,17	8963,0	50808,6
400	673	304,80	2051,3	11628,2	702	975	926,84	9036,7	51226,3
410	683	318,61	2176,1	12335,7	704	977	932,55	9111,0	51647,5
420	693	332,81	2306,4	13074,3	706	979	938,27	9185,7	52071,0
430	703	347,43	2442,4	13845,2	708	981	944,11	9261,7	52501,8
440	713	362,47	2584,4	14650,2	710	983	949,87	9337,2	52929,8
450	723	377,93	2732,4	15489,2	712	985	955,65	9413,2	53360,6
460	733	393,83	2886,8	16364,4	714	987	961,54	9490,4	53798,2
470	743	410,17	3047,6	17275,9	716	989	967,34	9566,9	54231,9
480	753	426,96	3215,0	18224,9	718	991	973,26	9645,0	54674,6
490	763	444,19	3389,2	19212,4	720	993	979,10	9722,5	55113,9
500	773	461,89	3570,4	20239,5					

Темпе- ратура, °C	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times$ $\times \left(\frac{T}{100}\right)^4$	Темпе- ратура, °C	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times$ $\times \left(\frac{T}{100}\right)^4$
722	995	985,05	9801,2	55560,1	842	1115	1386,2	15456	87615,4
724	997	991,02	9880,5	56009,6	844	1117	1393,7	15568	88250,3
726	999	997,00	9960,0	56460,3	846	1119	1401,2	15679	88879,5
728	1001	1003,0	10040	56913,7	848	1121	1408,7	15792	89520,1
730	1003	1009,0	10120	57367,0	850	1123	1416,2	15904	90155,0
732	1005	1015,1	10202	57832,1	852	1125	1423,8	16018	90801,2
734	1007	1021,1	10282	58285,6	854	1127	1431,4	16132	91447,5
736	1009	1027,2	10364	58750,4	856	1129	1439,1	16247	92099,4
738	1011	1033,4	10448	59226,4	858	1131	1446,7	16362	92751,3
740	1013	1039,5	10530	59691,4	860	1133	1454,4	16478	93408,8
742	1015	1045,7	10614	60167,4	862	1135	1462,1	16594	94066,4
744	1017	1051,9	10698	60643,8	864	1137	1469,9	16713	94741,0
746	1019	1058,1	10782	61119,8	866	1139	1477,6	16830	95404,2
748	1021	1064,3	10867	61601,8	868	1141	1485,4	16948	96073,1
750	1023	1070,6	10952	62083,6	870	1143	1493,3	17068	96753,4
752	1025	1076,9	11038	62571,1	872	1145	1501,1	17188	97433,6
754	1027	1083,2	11124	63058,6	874	1147	1509,0	17308	98113,9
756	1029	1089,5	11211	63551,8	876	1149	1516,9	17429	98799,8
758	1031	1096,0	11300	64056,3	878	1151	1524,8	17550	99485,7
760	1033	1102,3	11387	64549,5	880	1153	1532,8	17673	100183
762	1035	1108,7	11475	65048,3	882	1155	1540,8	17796	100880
764	1037	1115,2	11564	65552,8	884	1157	1548,8	17920	101583
766	1039	1121,6	11653	66057,4	886	1159	1556,9	18044	102286
768	1041	1128,1	11744	66573,2	888	1161	1564,9	18168	102989
770	1043	1134,6	11834	67083,4	890	1163	1573,0	18294	103703
772	1045	1141,1	11924	67593,6	892	1165	1581,2	18421	104423
774	1047	1147,7	12016	68115,1	894	1167	1589,3	18547	105137
776	1049	1154,3	12109	68642,3	896	1169	1597,5	18675	105863
778	1051	1160,9	12201	69163,8	898	1171	1605,7	18803	106589
780	1053	1167,6	12294	69691,0	900	1173	1613,9	18931	107314
782	1055	1174,2	12388	70223,9	902	1175	1622,2	19061	108051
784	1057	1180,9	12482	70756,7	904	1177	1630,5	19191	108788
786	1059	1187,6	12577	71295,2	906	1179	1638,9	19323	109536
788	1061	1194,4	12673	71839,4	908	1181	1647,2	19453	110273
790	1063	1201,2	12768	72378,0	910	1183	1655,6	19586	111027
792	1065	1207,9	12864	72922,2	912	1185	1664,0	19718	111775
794	1067	1214,8	12962	73477,7	914	1187	1672,4	19851	112529
796	1069	1221,6	13059	74027,6	916	1189	1680,9	19986	113295
798	1071	1228,5	13157	74583,1	918	1191	1689,4	20121	114060
800	1073	1235,4	13256	75144,3	920	1193	1697,3	20249	114786
802	1075	1242,3	13354	75699,8	922	1195	1706,5	20393	115602
804	1077	1249,2	13453	76261,0	924	1197	1715,1	20530	116378
806	1079	1256,2	13554	76833,6	926	1199	1723,7	20667	117155
808	1081	1263,2	13655	77406,1	928	1201	1732,3	20805	117936
810	1083	1270,2	13756	77978,6	930	1203	1741,0	20944	118725
812	1085	1277,3	13858	78556,8	932	1205	1749,7	21084	119519
814	1087	1284,4	13961	79140,7	934	1207	1758,4	21224	120312
816	1089	1291,5	14064	79724,6	936	1209	1767,2	21365	121112
818	1091	1298,6	14167	80308,5	938	1211	1776,0	21507	121917
820	1093	1305,8	14272	80903,7	940	1213	1784,8	21649	122722
822	1095	1312,9	14376	81493,2	942	1215	1793,6	21792	123532
824	1097	1320,1	14481	82088,4	944	1217	1802,5	21936	124348
826	1099	1327,4	14588	82695,0	946	1219	1811,4	22081	125171
828	1101	1334,6	14694	83295,9	948	1221	1820,3	22226	125993
830	1103	1341,0	14801	83902,4	950	1223	1829,3	22372	126820
832	1105	1349,2	14909	84514,6	952	1225	1838,3	22519	127653
834	1107	1356,6	15018	85132,5	954	1227	1847,3	22666	128487
836	1109	1363,9	15126	85744,8	956	1229	1856,3	22814	129326
838	1111	1371,3	15235	86362,6	958	1231	1865,4	22963	130170
840	1113	1378,7	15345	86986,2	960	1233	1874,5	23113	131021

Температура, °C	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4$	Температура, °C	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4$
962	1235	1883,7	23264	131877	1082	1355	2487,8	33710	191092
964	1237	1892,8	23414	132727	1084	1357	2498,8	33908	192214
966	1239	1902,0	23566	133589	1086	1359	2509,9	34109	193354
968	1241	1911,2	23718	134750	1088	1361	2521,0	34311	194499
970	1243	1920,5	23872	135323	1090	1363	2532,1	34512	195638
972	1245	1929,8	24026	136196	1092	1365	2543,3	34716	196796
974	1247	1939,1	24181	137075	1094	1367	2554,5	34920	197951
976	1249	1948,4	24336	137953	1096	1369	2565,7	35124	199107
978	1251	1957,8	24492	138838	1098	1371	2576,9	35329	200270
980	1253	1967,2	24649	139728	1100	1373	2588,3	35537	201449
982	1255	1976,7	24808	140629	1102	1375	2599,6	35745	202628
984	1257	1986,1	24965	141519	1104	1377	2611,0	35953	203807
986	1259	1995,6	25125	142426	1106	1379	2622,4	36163	204997
988	1261	2005,1	25285	143327	1108	1381	2633,8	36373	206188
990	1263	2014,7	25446	144246	1110	1383	2645,2	36583	207378
992	1265	2024,3	25607	145158	1112	1385	2656,7	36795	208580
994	1267	2033,9	25770	146082	1114	1387	2668,3	37009	209793
996	1269	2043,5	25932	147001	1116	1389	2679,8	37222	211000
998	1272	2053,2	26096	147930	1118	1391	2691,4	37437	212219
1000	1273	2062,9	26261	148866	1120	1393	2703,0	37653	213444
1002	1275	2072,6	26426	149801	1122	1395	2714,7	37870	214674
1004	1277	2082,4	26592	150742	1124	1397	2726,4	38088	215909
1006	1279	2092,2	26759	151689	1126	1399	2738,1	38306	217145
1008	1281	2102,1	26928	152647	1128	1401	2749,9	38526	218392
1010	1283	2111,9	27096	153599	1130	1403	2761,7	38747	219645
1012	1285	2121,8	27265	154557	1132	1405	2773,5	38968	220898
1014	1287	2131,8	27436	155526	1134	1407	2785,3	39189	222151
1016	1289	2141,7	27607	156496	1136	1409	2797,3	39414	223426
1018	1291	2151,7	27778	157465	1138	1411	2809,2	39638	224696
1020	1293	2161,6	27949	158434	1140	1413	2821,2	39864	225977
1022	1295	2171,7	28124	159427	1142	1415	2833,1	40088	227247
1024	1297	2181,8	28298	160413	1144	1417	2845,2	40316	228539
1026	1299	2191,9	28473	161405	1146	1419	2857,3	40545	229837
1028	1301	2202,1	28649	162403	1148	1421	2869,3	40773	231130
1030	1303	2212,2	28825	163400	1150	1423	2881,4	41002	232428
1032	1305	2222,4	29002	164404	1152	1425	2893,6	41234	233743
1034	1307	2232,7	29181	165418	1154	1427	2905,8	41466	235058
1036	1309	2242,9	29360	166433	1156	1429	2918,1	41700	236385
1038	1311	2253,2	29539	167448	1158	1431	2930,3	41933	237706
1040	1313	2263,6	29721	168479	1160	1433	2942,6	42167	239032
1042	1315	2273,9	29902	169505	1162	1435	2955,0	42404	240376
1044	1317	2284,3	30084	170537	1164	1437	2967,4	42642	241725
1046	1319	2294,7	30267	171575	1166	1439	2979,8	42879	243068
1048	1321	2305,2	30452	172623	1168	1441	2992,2	43118	244423
1050	1323	2315,7	30637	173672	1170	1443	3004,6	43356	245772
1052	1325	2326,2	30822	174721	1172	1445	3017,2	43599	247150
1054	1327	2336,7	31008	175775	1174	1447	3029,7	43840	248516
1056	1329	2347,3	31196	176841	1176	1449	3042,3	44083	249893
1058	1331	2358,0	31385	177912	1178	1451	3054,9	44327	251276
1060	1333	2368,6	31573	178978	1180	1453	3067,6	44572	252665
1062	1335	2379,2	31762	180049	1182	1455	3080,3	44818	254060
1064	1337	2390,0	31954	181138	1184	1457	3092,9	45064	255454
1066	1339	2400,7	32145	182220	1186	1459	3105,7	45312	256860
1068	1341	2411,4	32337	183309	1188	1461	3118,5	45561	258272
1070	1343	2422,2	32530	184403	1190	1463	3131,4	45812	259694
1072	1345	2433,1	32725	185508	1192	1465	3144,2	46063	261117
1074	1347	2444,0	32920	186614	1194	1467	3157,1	46315	262546
1076	1349	2454,9	33117	187730	1196	1469	3170,0	46567	263974
1078	1351	2465,8	33313	188841	1198	1471	3183,0	46822	265420
1080	1353	2476,8	33511	189964	1200	1473	3196,0	47077	266865

Температура, °C	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4$	Температура, °C	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4$
1202	1475	3209,1	47334	268322	1322	1595	4057,7	64720	366878
1204	1477	3222,1	47590	269773	1324	1597	4073,0	65046	368726
1206	1479	3235,2	47849	271242	1326	1599	4088,3	65372	370572
1208	1481	3248,4	48109	272715	1328	1601	4103,7	65700	372434
1210	1483	3261,5	48368	274184	1330	1603	4119,1	66029	374298
1212	1485	3274,8	48631	275675	1332	1605	4134,5	66359	376169
1214	1487	3288,0	48893	277160	1334	1607	4149,9	66689	378040
1216	1489	3301,3	49156	278651	1336	1609	4165,4	67021	379922
1218	1491	3314,6	49421	280153	1338	1611	4181,0	67356	381821
1220	1493	3327,9	49686	281655	1340	1613	4196,7	67693	383731
1222	1495	3341,4	49954	283174	1342	1615	4212,2	68027	385624
1224	1497	3354,8	50221	284688	1344	1617	4228,0	68367	387552
1226	1499	3368,3	50491	286218	1346	1619	4243,7	68705	389468
1228	1501	3381,8	50761	287749	1348	1621	4259,3	69043	391384
1230	1503	3395,3	51031	289279	1350	1623	4275,1	69385	393323
1232	1505	3408,8	51302	290816	1352	1625	4291,0	69729	395273
1234	1507	3422,4	51575	292363	1354	1627	4306,9	70073	397223
1236	1509	3436,0	51849	293916	1356	1629	4322,8	70418	399179
1238	1511	3449,8	52126	295487	1358	1631	4338,7	70764	401140
1240	1513	3463,6	52404	297063	1360	1633	4354,7	71112	403113
1242	1515	3477,2	52680	298627	1362	1635	4370,7	71461	405091
1244	1517	3491,1	52960	300214	1364	1637	4386,8	71812	407081
1246	1519	3504,9	53239	301796	1366	1639	4402,9	72163	409070
1248	1521	3518,7	53519	303383	1368	1641	4419,0	72516	411071
1250	1523	3532,6	53801	304982	1370	1643	4435,2	72870	413078
1252	1525	3546,6	54086	306597	1372	1645	4451,4	73226	415096
1254	1527	3560,6	54370	308207	1374	1647	4467,7	73582	417114
1256	1529	3574,6	54656	309828	1376	1649	4483,9	73939	419180
1258	1531	3588,6	54941	311444	1378	1651	4500,3	74300	421184
1260	1533	3602,6	55228	313071	1380	1653	4516,7	74661	423231
1262	1535	3616,8	55518	314715	1382	1655	4533,1	75023	425282
1264	1537	3630,9	55807	316353	1384	1657	4549,5	75385	427335
1266	1539	3645,1	56098	318003	1386	1659	4566,0	75750	429404
1268	1541	3659,4	56391	319664	1388	1661	4582,6	76117	431484
1270	1543	3673,6	56684	321325	1390	1663	4599,1	76483	433559
1272	1545	3687,9	56978	322991	1392	1665	4615,7	76851	435645
1274	1547	3702,3	57275	324675	1394	1667	4632,4	77222	437748
1276	1549	3716,7	57572	326358	1396	1669	4649,1	77593	439851
1278	1551	3731,1	57869	328042	1398	1671	4665,8	77966	441966
1280	1553	3745,5	58168	329737	1400	1673	4682,6	78340	444086
1282	1555	3760,0	58468	331437	1405	1678	4724,7	79280	449415
1284	1557	3774,6	58771	333155	1410	1683	4767,1	80230	454800
1286	1559	3789,1	59072	334861	1415	1688	4809,7	81188	460230
1288	1561	3803,7	59376	336585	1420	1693	4852,6	82155	465712
1290	1563	3818,4	59682	338319	1425	1698	4895,7	83129	471233
1292	1565	3833,0	59986	340043	1430	1703	4939,1	84113	476811
1294	1567	3847,8	60295	341794	1435	1708	4982,7	85105	482435
1296	1569	3862,5	60603	343540	1440	1713	5026,6	86106	488109
1298	1571	3877,3	60912	345292	1445	1718	5070,7	87115	493829
1300	1573	3892,1	61221	347043	1450	1723	5115,1	88133	499600
1302	1575	3906,9	61535	348823	1455	1728	5159,8	89161	505427
1304	1577	3921,9	61848	350598	1460	1733	5204,7	90197	511300
1306	1579	3939,3	62201	352599	1465	1738	5249,9	91243	517229
1308	1581	3951,8	62478	354169	1470	1743	5295,3	92297	523204
1310	1583	3966,8	62794	355960	1475	1748	5341,0	93361	529236
1312	1585	3981,9	63113	357769	1480	1753	5387,0	94434	535318
1314	1587	3997,0	63432	359577	1485	1758	5433,2	95516	541452
1316	1589	4012,1	63752	361391	1490	1763	5479,7	96607	547636
1318	1591	4027,3	64074	363216	1495	1768	5526,5	97709	553883
1320	1593	4042,5	64357	364821	1500	1773	5573,5	98818	560170

Температура, °C	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4$	Температура, °C	T	$\left(\frac{T}{100}\right)^3$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$5,67 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4$
1505	1778	5620,8	99938	566519	1755	2028	8340,7	169149	958855
1510	1783	5668,3	101066	572912	1760	2033	8402,6	170825	968356
1515	1788	5716,1	102204	579364	1765	2038	8464,7	172510	977907
1520	1793	5764,1	103350	585860	1770	2043	8527,2	174211	976212
1525	1798	5812,6	104511	592442	1775	2048	8589,9	175921	997243
1530	1803	5861,2	105677	599051	1780	2053	8653,0	177646	1007022
1535	1808	5910,2	106856	605735	1785	2058	8716,4	179384	1016874
1540	1813	5959,1	108038	612435	1790	2063	8780,1	181133	1026789
1545	1818	6008,7	109238	619237	1795	2068	8844,1	182896	1036783
1550	1823	6058,4	110444	626074	1800	2073	8908,4	184671	1046844
1555	1828	6108,4	111662	632973	1805	2078	8973,0	186459	1056980
1560	1833	6158,7	112889	639934	1810	2083	9037,9	188256	1067167
1565	1838	6209,2	114125	646940	1815	2088	9103,1	190073	1077467
1570	1843	6260,0	115372	654009	1820	2093	9168,7	191901	1087829
1575	1848	6311,1	116629	661135	1825	2098	9234,6	193742	1098265
1580	1853	6362,5	117897	668323	1830	2103	9300,7	195595	1108769
1585	1858	6414,0	119172	675550	1835	2108	9367,2	197461	1119347
1590	1863	6466,1	120463	682869	1840	2113	9434,1	199342	1130009
1595	1868	6518,2	121759	690215	1845	2118	9501,2	201235	1140741
1600	1873	6570,7	123069	697641	1850	2123	9568,6	203142	1151551
1605	1878	6620,9	124341	704852	1855	2128	9636,4	205063	1162441
1610	1883	6675,5	125718	712658	1860	2133	9704,5	206997	1173404
1615	1888	6725,9	126985	719840	1865	2138	9772,9	208945	1184446
1620	1893	6783,5	128412	727929	1870	2143	9841,6	210905	1195557
1625	1898	6837,4	129774	735678	1875	2148	9910,7	212882	1206764
1630	1903	6891,5	131145	743422	1880	2153	9980,0	214869	1218028
1635	1908	6946,1	132532	751318	1885	2158	10050	216879	1229421
1640	1913	7000,8	133925	759181	1890	2163	10120	218896	1240856
1645	1918	7055,7	135328	767134	1895	2168	10190	220919	1252324
1650	1923	7111,1	136746	775172	1900	2173	10261	222971	1263956
1655	1928	7166,7	138174	783267	1905	2178	10332	225031	1275633
1660	1933	7222,6	139613	791424	1910	2183	10403	227097	1287345
1665	1938	7278,8	141063	799644	1915	2188	10475	229193	1299226
1670	1943	7335,3	142525	807931	1920	2193	10547	231296	1311147
1675	1948	7392,1	143998	816281	1925	2198	10619	233406	1323108
1680	1953	7449,2	145483	824699	1930	2203	10692	235545	1335234
1685	1958	7506,5	146977	833168	1935	2208	10765	237691	1347400
1690	1963	7564,2	148485	841717	1940	2213	10838	239845	1359609
1695	1968	7622,1	150003	850322	1945	2218	10911	242006	1371859
1700	1973	7680,4	151534	859001	1950	2223	10985	244197	1384280
1705	1978	7738,9	153075	867736	1955	2228	11060	246417	1396864
1710	1983	7797,7	154628	876540	1960	2233	11134	248622	1409364
1715	1988	7856,9	156195	885423	1965	2238	11209	250857	1422033
1720	1993	7916,3	157772	894362	1970	2243	11285	253123	1434878
1725	1998	7976,0	159360	903364	1975	2248	11360	255373	1447633
1730	2003	8036,0	160961	912440	1980	2253	11436	257653	1460558
1735	2008	8096,4	162576	921595	1985	2258	11513	259964	1473658
1740	2013	8157,0	164200	930801	1990	2263	11589	262259	1486668
1745	2018	8217,9	165837	940080	1995	2268	11666	264585	1499853
1750	2023	8279,2	167488	949439	2000	2273	11812	268487	1521972

Энергия излучения серого тела

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon \cdot 4,96 \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C \left(\frac{T}{100}\right)^4.$$

Здесь C — коэффициент излучения серого тела.

Закон Вина устанавливает связь между температурой и длиной волны λ_{\max} с максимальной интенсивностью излучения и гласит, что с повы-

шением температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких волн, $\lambda_{\max} T = 2,88 \text{ мм} \cdot \text{К}$. Произведение длины волны, соответствующей максимальной интенсивности излучения, на абсолютную температуру является постоянной величиной.

Закон косинусов (Ламберта). Согласно этому закону, количество энергии, излучаемое элементом поверхности dF_1 в направлении элемента dF_2 (с углом φ между нормальными к поверхностям), пропорционально количеству энергии, излучаемой по нормали dE_n , умноженному на величину пространственного угла $d\omega$ и $\cos \varphi$, т. е.

$$d^2 E_{\varphi} = d E_n d \omega \cos \varphi \text{ Вт.}$$

Следствие, вытекающее из этого закона: лучеиспускательная способность в направлении нормали в π раз меньше полной лучеиспускательной способности тела:

$$E_n = \frac{E}{\pi} = \frac{1}{\pi} C \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \frac{\epsilon}{\pi} C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4;$$

$$d^2 E_{\varphi} = \frac{\epsilon}{\pi} C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 d \omega d F_1 \cos \varphi.$$

Закон квадратов расстояний гласит, что плотность лучистого потока изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника излучения:

$$E_r = E_1 / r^2,$$

где E_1 — плотность лучистого потока на расстоянии 1 м от излучателя;
 E_r — то же, на расстоянии r , м.

Свойства лучистых потоков

При расчете теплообмена между телами применяют метод поточной алгебры, который использует приведенные ниже понятия и свойства лучистых потоков.

Угловой коэффициент, или коэффициент облученности, φ_{12} показывает, какая часть полусферического лучистого потока, излучаемого одним телом Q_1 , попадает на другое тело Q_{12} , находящееся с ним в процессе теплообмена:

$$\varphi_{12} = \frac{Q_{12}}{Q_1} = \frac{F_{12}}{F_1} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi r^2} d F_1 \cdot d F_2;$$

$$\varphi_{21} = \frac{Q_{21}}{Q_2} = \frac{F_{21}}{F_2} = \frac{1}{F_2} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} d F_1 \cdot d F_2,$$

где F_1 и F_2 — поверхности тел, находящихся в состоянии теплообмена, а F_{12} — расчетная поверхность при определении количества тепла, переданного с первого тела на второе.

Свойство совмещаемости определяет условие равенства тепловых потоков, исходящих от одного и того же тела и полностью проектирующихся на стоящие друг за другом тела:

$$Q_{12} = Q_{13}; \quad Q_{12} = \varphi_{12} \cdot F_1 \cdot E_1 = E_1 F_{12};$$

$$Q_{13} = \varphi_{13} \cdot F_1 \cdot E_1 = E_1 F_{13}; \quad \varphi_{12} = \varphi_{13}; \quad F_{12} = F_{13}.$$

Свойство распределительности заключается в том, что лучистый поток от тела 1 на тело 2 складывается из потоков между отдельными частями тел 1 и 2:

$$Q_{12} = Q_{1a, 2a} + Q_{1a, 2b} + Q_{1b, 2a} + Q_{1b, 2b};$$

$$F_{12} = F_{1a, 2a} + F_{1a, 2b} + F_{1b, 2a} + F_{1b, 2b}.$$

Свойство затеняемости — если на пути всех лучей от тела 1 на тело 2 помещается непрозрачное тело, то лучистый поток равен нулю:

$$Q_{12} = 0; \quad F_{12} = 0; \quad \varphi_{12} = 0.$$

Отсюда следствие: для плоских и выпуклых тел отсутствует самооблучение:

$$Q_{11} = 0; \quad \varphi_{11} = 0; \quad F_{11} = 0.$$

Свойство замыкаемости состоит в том, что для замкнутой системы тел и сред лучистый поток, посылаемый одним из тел на все остальные, равен полусферическому излучению этого тела:

$$\sum_{i=1}^n Q_{k,i} = Q_k = F_k E_k; \quad \sum_{i=1}^n \varphi_{k,i} = 1; \quad \sum_{i=1}^n F_{k,i} = F_k$$

для $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Если тело k имеет вогнутости, то в число тел n должно входить и тело k .

Свойство взаимности. Если имеются абсолютно черные тела 1 и 2, находящиеся в состоянии теплообмена, то при равенстве температур будет иметь место равенство лучистых потоков независимо от формы и расположения этих тел среди других:

$$Q_{12} = Q_{21}; \quad \varphi_{12} F_1 = \varphi_{21} F_2; \quad F_{12} = F_{21}.$$

Теплообмен посредством излучения между двумя абсолютно черными телами, произвольно расположенными в пространстве

Количество тепла между двумя абсолютно черными телами 1 и 2 определяют по формуле

$$Q_{012} = C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12} \tau \text{ кДж},$$

где F_{12} — расчетная поверхность теплообмена, определяемая из выражения

$$F_{12} = \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2 \text{ м}^2,$$

$$F_{12} = \varphi_{12} \cdot F_1; \quad F_{21} = \varphi_{21} \cdot F_2;$$

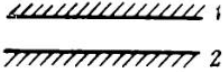
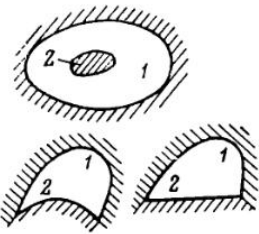
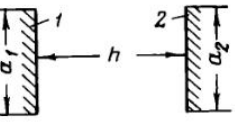
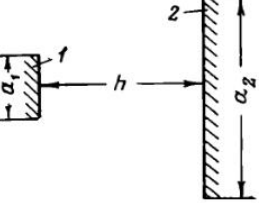
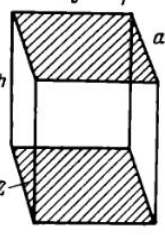
φ_1 и φ_2 — углы между нормалью в центре элементарных площадок и направлением лучистого потока;

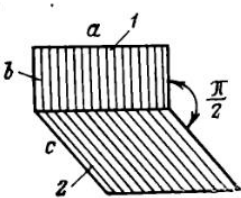
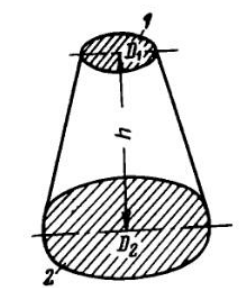
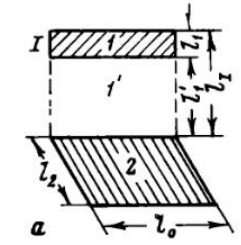
F_1 и F_2 — поверхности тел 1 и 2, участвующих в теплообмене;

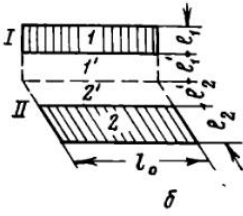
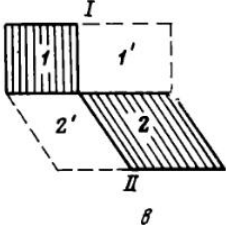
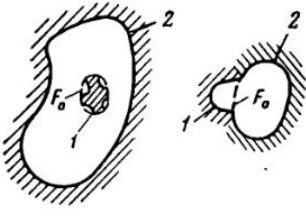
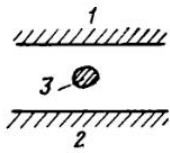
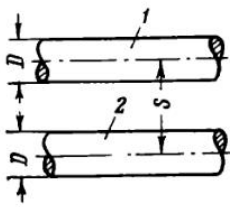
r — расстояние между элементарными площадками dF_1 и dF_2 .

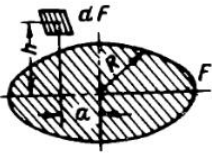
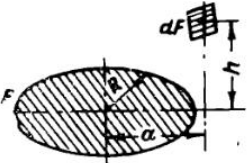
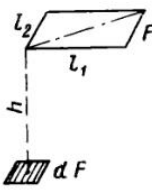
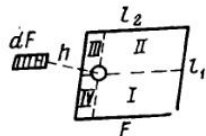
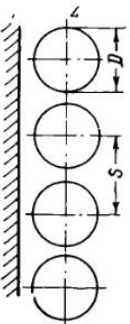
Угловые коэффициенты и расчетные поверхности, определенные методами «соотношения проекций», «натянутых нитей» и др., для различных случаев теплообмена между двумя произвольно расположенными в пространстве абсолютно черными телами представлены в табл. XII-6.

Формулы для расчета угловых коэффициентов и расчетных поверхностей

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности
1. Две параллельные плоскости, размеры которых значительно больше расстояния между ними		$\Phi_{12} = \Phi_{21} = 1$ $F_{12} = F_1 = F_2$
2а*. Одно тело, не имеющее вогнутостей, находится внутри другого тела. 2б*. Две поверхности образуют замкнутую систему, причем одна из поверхностей не имеет вогнутостей		$\Phi_{21} = 1; \quad \Phi_{12} = \frac{F_2}{F_1}$ $F_{12} = F_2$
3. Две бесконечные параллельные полосы одинаковой ширины		$\Phi_{12} = \Phi_{21} = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2} - \frac{h}{a};$ $F_{12} = \sqrt{a^2 + h^2} - h.$ <p>Поверхность F_{12} отнесена к 1 м длины полос $a = a_1 = a_2$.</p>
4. Две бесконечные параллельные полосы разной ширины		$\Phi_{12} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_2 + 1}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{h}{a_1}\right)^2} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_2 - 1}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{h}{a_1}\right)^2};$ $\Phi_{21} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_1 + 1}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{h}{a_2}\right)^2} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_1 - 1}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{h}{a_2}\right)^2};$ $F_{12} = \sqrt{\frac{1}{4} (a_2 + a_1)^2 + h^2} - \sqrt{\frac{1}{4} (a_2 - a_1)^2 + h^2}.$ <p>Поверхность F_{12} отнесена к 1 м длины полос</p>
5. Два одинаковых прямоугольника, расположенных в параллельных плоскостях друг против друга (см. рис. 147)		$\Phi_{12} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{1}{a} \sqrt{a^2 + h^2} \operatorname{arctg} \times \right.$ $\times \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{1}{b} \sqrt{b^2 + h^2} \times$ $\times \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} - \frac{h}{a} \operatorname{arctg} \times$ $\times \left(\frac{b}{h}\right) - \frac{h}{b} \operatorname{arctg} \left(\frac{a}{h}\right) +$ $\left. + \frac{h^2}{2ab} \ln \frac{(a^2 + h^2)(b^2 + h^2)}{(a^2 + b^2 + h^2)h^2} \right];$ $F_{12} = a \cdot b \cdot \Phi_{12}$

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности
		<p>Для квадратов ($a = b$)</p> $\Phi_{12} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2}{a} \sqrt{a^2 + h^2} \operatorname{arctg} \times \right. \\ \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} - 2 \frac{h}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{h} + \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \ln \frac{(a^2 + h^2)^2}{h^2 (2a^2 + h^2)} \right];$ $F_{12} = a^2 \Phi_{12}.$ <p>Расчетные значения см. рис. 147</p>
<p>6. Два взаимно перпендикулярных прямоугольника, имеющих общую грань (см. рис. 148)</p>		$\Phi_{12} = \frac{1}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{a}{b} + \frac{c}{b} \operatorname{arctg} \frac{a}{c} - \right. \\ \left. - \sqrt{\left(\frac{c}{a} \right)^2 - 1} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{b^2 + c^2}} + \right. \\ \left. + \frac{c^2}{4ab} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2) c^2}{(a^2 + c^2) (b^2 + c^2)} + \right. \\ \left. + \frac{b}{4a} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2) b^2}{(a^2 + c^2) (b^2 + c^2)} - \right. \\ \left. - \frac{a}{4b} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2) a^2}{(a^2 + b^2) (a^2 + c^2)} \right];$ $F_{12} = ab \Phi_{12}.$ <p>Расчетные значения см. рис. 148</p>
<p>7. Два параллельных круга с центрами на общей нормали к их плоскостям (см. рис. 149)</p>		<p>а.</p> $\Phi_{12} = \left[\sqrt{\left(\frac{D_2}{2D_1} + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{h}{D_1} \right)^2} - \right. \\ \left. - \sqrt{\left(\frac{D_2}{2D_1} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{h}{D_1} \right)^2} \right];$ $F_{12} = \frac{\pi}{4} \left[\sqrt{\left(\frac{D_2 + D_1}{2} \right)^2 + h^2} - \right. \\ \left. - \sqrt{\left(\frac{D_2 - D_1}{2} \right)^2 + h^2} \right]^2$ <p>б. Для кругов одинакового диаметра $D_1 = D_2 = D$</p> $\Phi_{12} = \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h}{D} \right)^2} - \frac{h}{D} \right]^2;$ $F_{12} = \frac{\pi}{4} (\sqrt{D^2 + h^2} - h)^2.$ <p>Расчетные значения см. рис. 149</p>
<p>8. Два прямоугольника, расположенных в перпендикулярных плоскостях и не имеющих общей грани</p>		$F_{12} = F_{12} - F_{1'2'}; \quad I = 1 + 1';$ $\Phi_{12} = \frac{F_{12}}{l_1 l_2} = \Phi_{12} \frac{l_1 + l_1'}{l_1} - \Phi_{1'2'} \frac{l_1'}{l_1};$

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности
		$\varphi_{12} = (\varphi_{I, II} - \varphi_{12'}) \frac{l_1 + l_1'}{l_1} =$ $= (\varphi_{I', II} - \varphi_{1'2'}) \frac{l_1'}{l_1};$ $F_{12} = \varphi_{12} l_1 l_0 = F_{I, II} - F_{12'} +$ $+ F_{1'2'} - F_{1'11};$ $I = 1 + 1'; \quad II = 2 + 2'$
		$\varphi_{12} = \frac{F_{12}}{F_1};$ $F_{12} = \frac{1}{2} (F_{I, II} - F_{12'} - F_{1'2'});$ $I = 1 + 1'; \quad II = 2 + 2'$
<p>9*. Две поверхности, образующие замкнутую полость. Меньшая поверхность имеет вогнутости</p>		$\varphi_{12} = \frac{F_0}{F_1}; \quad \varphi_{21} = \frac{F_0}{F_2};$ $F_{12} = F_0,$ <p>где F_0 — поверхность, «натянутая» на соответствующий контур</p>
<p>10. Выпуклое тело, находящееся между двумя параллельными стенками. Размеры тела малы по сравнению с размерами поверхностей</p>		$\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1;$ $\varphi_{23} = \varphi_{13} = 0;$ $\varphi_{31} = \varphi_{32} = \frac{1}{2};$ $F_{12} = F_1 - F_2;$ $F_{13} = F_{31} = F_{23} = F_{32} = \frac{1}{2} F_3$
<p>11. Два параллельных цилиндра одинакового диаметра</p>		$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin \frac{D}{s} + \right.$ $\left. + \sqrt{\left(\frac{s}{D}\right)^2 - 1} - \frac{s}{D} \right];$ $F_{12} = \sqrt{s^2 - D^2} + D \arcsin \frac{D}{s} - s.$ <p>Поверхность F_{12} отнесена к 1 м длины цилиндров</p>

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности
<p>12. Элементарная площадка dF и произвольный круг F, плоскость которого параллельна dF</p>		$\varphi_{dFF} = \frac{1}{2} \times$ $\times \left[1 - \frac{h^2 + a^2 - R^2}{\sqrt{(h^2 + a^2 + R^2)^2 - 4a^2 R^2}} \right];$ $F_{dFF} = \varphi_{dFF} dF$
<p>13. Элементарная площадка dF и произвольный круг F, плоскость которого перпендикулярна к dF</p>		$\varphi_{dFF} = \frac{h}{2a} \times$ $\times \left[\frac{h^2 + a^2 + R^2}{\sqrt{(h^2 + a^2 + R^2)^2 - 4a^2 R^2}} - 1 \right];$ $F_{dFF} = \varphi_{dFF} dF$
<p>14. Элементарная площадка dF и прямоугольник F, плоскость которого параллельна dF, причем одна вершина прямоугольника находится по нормали к центру dF (см. рис. 149)</p>		$\varphi_{dFF} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{l_1}{\sqrt{h^2 + l_1^2}} \times \right.$ $\times \operatorname{arctg} \frac{l_2}{\sqrt{h^2 + l_1^2}} +$ $\left. + \frac{l_2}{\sqrt{h^2 + l_2^2}} \operatorname{arctg} \frac{l_1}{\sqrt{h^2 + l_2^2}} \right];$ $\varphi_{FdF} = \varphi_{dFF} \frac{dF}{F};$ $F_{dFF} = \varphi_{dFF} dF = \varphi_{FdF} F.$ <p>Расчетные значения см. на рис. 119</p>
<p>15. Элементарная площадка dF и произвольный прямоугольник F, плоскость которого параллельна dF</p>		$\varphi_{dFF} = F_{dFI} + \varphi_{dFII} +$ $+ \varphi_{dFIII} + \varphi_{dFIV};$ $\varphi_{FdF} = \varphi_{dFF} \frac{dF}{F};$ $F_{dFF} = \varphi_{dFF} dF;$ $\varphi_{dFI}, \varphi_{dFII} \text{ и т. д.}$ <p>— см. предыдущую схему</p>
<p>16. Неограниченная плоскость и ряд труб в параллельной плоскости</p>		$\varphi_{12} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D}{s}\right)^2} +$ $+ \frac{D}{s} \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{s}{D}\right)^2 - 1};$ $\varphi_{21} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{s}{D} - \sqrt{\left(\frac{s}{D}\right)^2 - 1} + \right.$ $\left. + \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{s}{D}\right)^2 - 1} \right];$ $F_{12} = F_{21} = \varphi_{12} s = \varphi_{21} D\pi.$ <p>Поверхность F_{12} отнесена к одной трубе и l м длины трубы</p>

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности																	
		s/D	1	1,5	2	3	4	5	10										
		Φ_{12}	1	0,850	0,658	0,467	0,360	0,294	0,151										
17. Неограниченная плоскость и два ряда труб в параллельных плоскостях		$\Phi_{12} = 1 - (1 - \Phi'_{12})^2;$ $F_{12} = \Phi_{12} s$ (см. указание к предыдущей схеме). Φ'_{12} — угловой коэффициент для одного ряда труб (см. предыдущий случай)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>s/D</th> <th>1</th> <th>1,5</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Φ_{12}</td> <td>1</td> <td>0,977</td> <td>0,883</td> <td>0,715</td> <td>0,590</td> <td>0,500</td> <td>0,279</td> </tr> </tbody> </table>	s/D	1	1,5	2	3	4	5	10	Φ_{12}	1	0,977	0,883	0,715	0,590	0,500	0,279
s/D	1	1,5	2	3	4	5	10												
Φ_{12}	1	0,977	0,883	0,715	0,590	0,500	0,279												
18. Два произвольных цилиндрических тела, частично затеняемых окружающими телами		$\Phi_{12} = \frac{1}{2} \frac{A_1 NB_2 + A_2 MB_1 - A_1 CA_2 - B_1 KEB_2}{\text{периметр } NA_1 B_1 M}$ $\Phi_{21} = \Phi_{12} \frac{\text{периметр } NA_1 B_1 M}{\text{периметр } A_2 PRB_2};$ $F_{12} = F_{21} = \frac{1}{2} \times$ $\times (A_1 NB_2 + A_2 MB_1 - A_1 CA_2 - B_1 KEB_2).$ Поверхности отнесены к 1 м длины тел																	
19. Два произвольных тела, частично затеняемых расположенным между ними третьим телом (плоскопараллельная система)		$\Phi_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{B_1 C + CB_2 + A_1 K + A_2 E - B_1 B_2 - A_1 A_2 - EK}{\text{периметр } A_1 B_1} \right);$ $\Phi_{12} = \Phi_{21} \frac{\text{периметр } A_1 B_1}{\text{периметр } A_2 B_2};$ $F_{12} = \frac{1}{2} (B_1 C + CB_2 + A_1 K + A_2 E - B_1 B_2 - A_1 A_2 - EK).$ Поверхности отнесены к 1 м длины тела																	
20. Элементарная площадка dF и цилиндрическое тело (плоскопараллельная система)		$\Phi_{dFF} = \frac{1}{2} (\sin \gamma_2 - \sin \gamma_1) = \cos \theta \sin \alpha;$ $0 = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}; \quad \alpha = \frac{\gamma_2 + \gamma_1}{2};$ $F_{dFF} = \Phi_{dFF} dF$																	

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности
<p>21. Определение угловых коэффициентов по методу «соотношения проекций» (пространственная система)</p>		$\varphi_{dF_1 F_2} = \frac{F_2''}{\pi R^2};$ $\varphi_{F_1 F_2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \varphi_{dF_1 F_2} dF_1;$ $F_{dF_1 F_2} = \varphi_{dF_1 F_2} dF_1$
<p>22. Определение угловых коэффициентов по методу «соотношения проекций» (плоскопараллельная система)</p>		$\varphi_{dl_1 l_2} = \frac{l_2''}{2R};$ $\varphi_{l_1 l_2} = \frac{1}{l_1} \int_1 \varphi_{dl_1 l_2} dl_1;$ $F_{dF_1 F} = \varphi_{dFF} dF$
<p>23. Определение угловых коэффициентов по методу «натянутых нитей». Две произвольные невыгнутые поверхности, имеющие бесконечную протяженность в одном направлении</p>		$\varphi_{12} = \frac{AD + BC' C}{2AB} - \frac{BD + AC}{2AB};$ $F_{12} = \frac{1}{2} [AD + BC' C - BD - AC].$ <p>Поверхность F_{12} отнесена к 1 м длины в направлении бесконечной протяженности; C' — точка пересечения пунктирной прямой, идущей из точки В, с кривой CD</p>
<p>24*. Три невыгнутые поверхности, образующие замкнутую систему бесконечной протяженности</p>		$\varphi_{12} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{F_2}{F_1} - \frac{F_3}{F_1} \right);$ $\varphi_{21} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{F_1}{F_2} - \frac{F_3}{F_2} \right);$ $\varphi_{13} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{F_3}{F_1} - \frac{F_2}{F_1} \right);$ $\varphi_{23} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{F_3}{F_2} - \frac{F_1}{F_2} \right)$ <p>и т. д.</p> $F_{12} = \frac{1}{2} (F_1 + F_2 - F_3);$ $F_{13} = \frac{1}{2} (F_1 + F_3 - F_2);$ $F_{23} = \frac{1}{2} (F_2 + F_3 - F_1) \text{ и т. д.}$ <p>Все площади отнесены к 1 м длины поверхностей в направлении бесконечной протяженности</p>

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности
25*. Четыре вогнутые поверхности, образующие замкнутую систему бесконечной протяженности		$F_{12} = \frac{1}{2} [F_{AC} + F_{BD} - F_3 - F_4];$ $F_{13} = \frac{1}{2} [F_1 + F_3 - F_{AC}];$ $F_{14} = \frac{1}{2} [F_1 + F_4 - F_{BD}] \text{ и т. д.};$ $\Phi_{Kn} = \frac{F_{Kn}}{F_K}$
26*. Замкнутая система, состоящая из поверхностей 1 и 2 через которые подводится и отводится тепло, и отражающей поверхности R, не проводящей тепла		$\bar{\Phi}_{12} = \Phi_{12} + \frac{1}{\frac{1}{\Phi_1 R} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{1}{\Phi_2 R}}$ $\bar{F}_{12} = F_1 \bar{\Phi}_{12}$
26а. Частный случай: поверхности 1 и 2 не имеют вогнутостей		$\bar{\Phi}_{12} = \frac{F_2 - F_1 \Phi_{12}^2}{F_1 + F_2 - 2 F_1 \Phi_{12}};$ $\bar{F}_{12} = F_1 \bar{\Phi}_{12}$
26б. Частный случай: поверхности 1 и 2 равны и параллельны (диски, квадраты, прямоугольники и т. п.)		$\bar{\Phi}_{12} = \frac{1 + \Phi_{12}}{2};$ $\bar{F}_{12} = F_1 \bar{\Phi}_{12}$
27. Неограниченная плоскость 1 и однорядный или двухрядный пучок труб 2 при наличии отражающей поверхности R, расположенной за пучком		$\bar{\Phi}_{12} = \Phi_{12} (2 - \Phi_{12});$ $\bar{F}_{12} = F_1 \bar{\Phi}_{12} = F_2 \bar{\Phi}_{21}$
27а. Цилиндр бесконечной длины или шар		$\Phi_{12} = \frac{F_2}{F_1 + F_2}; \quad \Phi_{11} = \frac{F_1}{F_1 + F_2};$ $\Phi_{21} = \frac{F_1}{F_1 + F_2}; \quad \Phi_{22} = \frac{F_2}{F_1 + F_2};$ $F_{12} = \frac{F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2}$

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности
28. Шар внутри шара		$\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}; \quad \varphi_{22} = 1 - \frac{F_1}{F_2};$ $\varphi_{11} = 0; \quad \varphi_{12} = 1; \quad F_{12} = F_1$
29. Куб или параллелепипед		$\varphi_{22} = 0; \quad \varphi_{21} = 1;$ $\varphi_{12} = \frac{F_2}{F_1}; \quad \varphi_{11} = 1 - \frac{F_2}{F_1};$ $F_{12} = F_{21}, \text{ где } F_1 \text{ — сумма остальных пяти поверхностей параллелепипеда}$

* Формулы действительны и в том случае, если 1, 2, 3, 4 и R представляют собой длинные цилиндрические поверхности с параллельными образующими. Схемы при этом следует рассматривать как поперечные сечения цилиндрических поверхностей, а F_1, F_2 и т. д. — относить к 1 м длины системы.

Рис. 147. Значения углового коэффициента φ для случая лучистого теплообмена между плоскими параллельными фигурами:

a и D — сторона и диаметр фигуры; h — расстояние между плоскостями; 1—4 — при прямом лучистом обмене между поверхностями; 5—8 — при лучистом обмене между поверхностями с учетом отражения от соединяющей их нетеплопроводной оболочки; 1,5 — диски; 2,6 — квадраты; 3,7 — прямоугольники с отношением сторон 2:1; 4,8 — длинные узкие прямоугольники

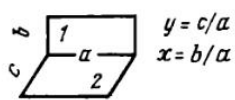
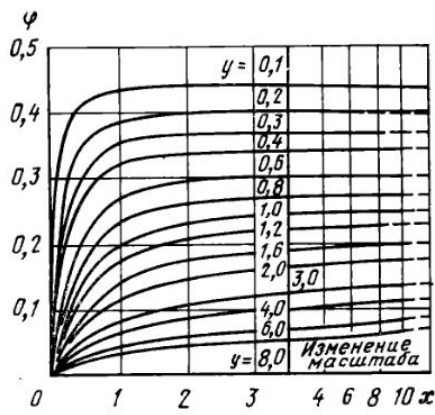
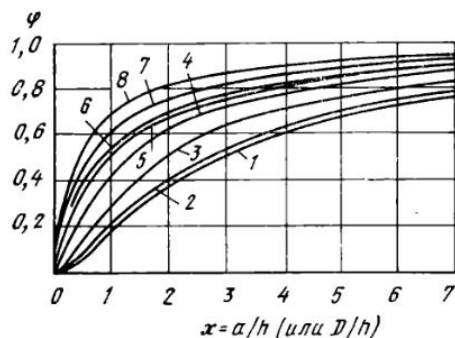


Рис. 148. Значения углового коэффициента φ для случая лучистого теплообмена между двумя взаимно перпендикулярными прямоугольниками с общей стороной a

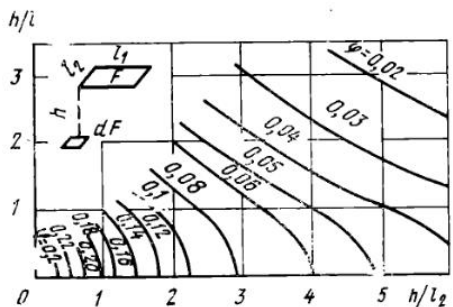


Рис. 149. Значения углового коэффициента φ для случая лучистого теплообмена между элементом dF и параллельным ему прямоугольником, через одну из вершин которого проходит нормаль к dF

Теплообмен излучением между серыми телами

Расчет лучистого теплообмена между двумя серыми телами, произвольно расположенными в пространстве, представляет чрезвычайно большие трудности, и точного решения в настоящее время не имеет. В практических расчетах используют понятие приведенной степени черноты системы тел $\epsilon_{пр}$, при помощи которой учитывают несовершенство поглощения лучистой энергии серыми телами и отраженные потоки:

$$Q_{12} = C_0 \cdot \epsilon_{пр} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12} \cdot \tau \text{ кДж.}$$

Для замкнутой системы двух серых тел приведенная степень черноты определяется из выражения

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}}$$

Здесь ϵ_1 и ϵ_2 — соответственно степени черноты 1-го и 2-го серых тел, угловые коэффициенты и расчетная поверхность теплообмена определяются, как показано выше для абсолютно черных тел.

Для случая $\varphi_{12} = 1$ и $\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$ имеем

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)},$$

когда $F_2 \gg F_1$, $\epsilon_{пр} \approx \epsilon_1$.

Для случая $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$ получим (см. рис. 150)

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} - \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - \frac{1}{2} \right)}$$

В приближенных расчетах иногда принимают $\epsilon_{пр} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2$. Такое упрощение дает удовлетворительные результаты для серых тел с высокой степенью черноты.

В расчетах часто пользуются понятием приведенного коэффициента излучения в системе двух серых тел: $C_{пр} = C_0 \cdot \epsilon_{пр}$.

Теплообмен при наличии экранов

Для уменьшения передачи тепла лучеиспусканием между излучающими поверхностями устанавливают экраны. При расчетах теплообмена считают, что экраны не обладают термическим сопротивлением: $R \rightarrow 0$ и являются непрозрачными для теплового излучения. При равенстве степеней черноты поверхностей теплообмена N_3 экранов приведенная степень черноты равна

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{2(N_3 + 1) \left(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{2} \right)}$$

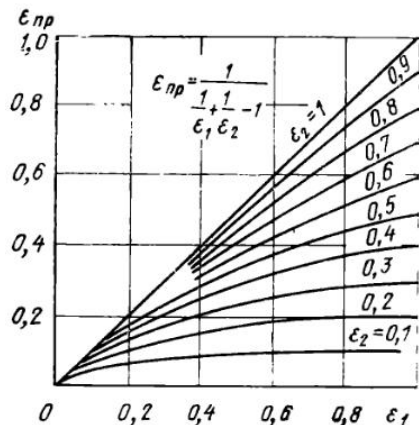


Рис. 150. Значения приведенной степени черноты $\epsilon = f(\epsilon_1, \epsilon_2)$

Если степень черноты поверхностей различна, то расчетная формула имеет вид

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\sum_1^n \left(\frac{1}{\epsilon_i} - \frac{1}{2} \right)},$$

где n — число мест сопротивлений переносу лучистой энергии, равное числу поверхностей на пути перехода тепловой энергии. При наличии одного экрана $n=4$, при двух экранах $n=6$ и т. д.

Излучение через отверстия

При излучении через отверстия в толстых стенах имеет место прямое излучение через основание отверстия на внутренней поверхности стены.

Кроме того, происходят дополнительные потери тепла вследствие отражения и излучения от боковых стен канала через отверстие в наружной поверхности печи.

Суммарные потери тепла в этом случае определяются по формуле

$$Q = C_0 \left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 \cdot F_{\text{отв}} \cdot \Phi \text{ Вт,}$$

где Φ — коэффициент диафрагмирования отверстия с площадью $F_{\text{отв}}$, определяемый по графикам рис. 151.

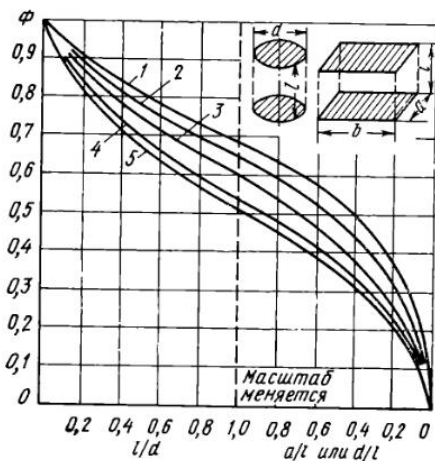


Рис. 151. Коэффициенты диафрагмирования Φ при излучении через отверстия:
1 — длинные полосы; $a:b=0$; 2 — прямоугольники, $a:b=0,2$; 3 — прямоугольники, $a:b=0,5$; 4 — квадраты, $a:b=1$; 5 — круги

Излучение газов и паров

Все газы и пары обладают способностью поглощать и излучать лучистую энергию. Излучательная способность газов, молекулы которых состоят из одного или двух атомов, столь незначительна, что в теплотехнических расчетах они принимаются лучепрозрачными. Трех- и более атомные газы обладают значительной селективной излучательной и поглощательной способностью. Наибольший интерес представляет излучение углекислоты, CO_2 и водяного пара, H_2O , входящих в состав продуктов сгорания. Излучение и поглощение лучистой энергии газами имеет избирательный, селективный характер. Лишь в определенных интервалах длин волн, так называемых полосок, расположенных в различных частях спектра, происходит поглощение и излучение энергии. В диапазонах этих полос излучения степень черноты газа различна. Для лучей

других длин волн, вне этих полос, газы прозрачны и их энергия излучения равна нулю. На рис. 152 показана поглощательная способность толстых слоев CO_2 и H_2O в различных частях спектра и на рис. 153 излучательная способность CO_2 и H_2O для слоев бесконечной толщины на всех длинах волн.

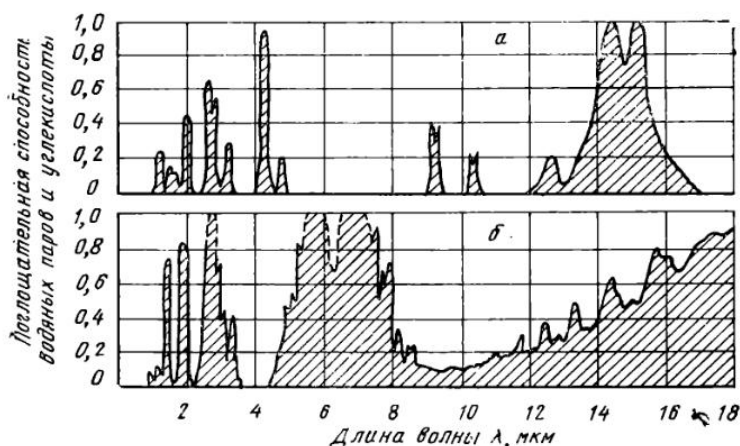


Рис. 152. Поглощательная способность толстых слоев CO_2 (а) и H_2O (б) в различных частях спектра

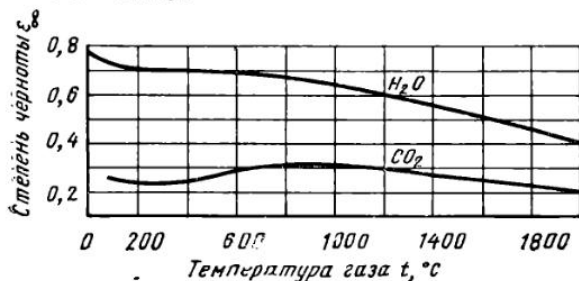


Рис. 153. Предельная наибольшая излучательная способность CO_2 и H_2O для слоев бесконечной толщины

Энергия излучения водяных паров и углекислоты зависит от парциального давления газа p , Н/м^2 , толщины слоя, s , м, и температуры. Математически эта связь выражается формулами

$$E_{\text{CO}_2} = 4,1 (p \cdot s)^{1/3} \left(\frac{T}{100} \right)^{3,5} \text{ Вт/м}^2$$

и

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 40,7 p^{0,8} \cdot s^{0,6} \left(\frac{T}{100} \right)^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Для расчетов теплообмена между серыми телами и газами применять эти формулы неудобно, поскольку все они имеют различный показатель степени у температуры. Для универсальности расчетов принимается, что лучеиспускательная способность углекислоты и водяных паров пропорциональна температуре T^4 . Необходимая в этом случае поправка вводится в общую степень черноты газа ϵ , которая учитывает также непостоянство ϵ_g , степени черноты газа для различных длин волн. Энергия излучения CO_2 и H_2O определяется из выражений

$$E_{\text{CO}_2} = \epsilon_{\text{CO}_2} \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{и} \quad E_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Излучательная способность газа, содержащего CO_2 и H_2O , определяется по формуле

$$E_r = \epsilon_r \cdot C_0 \left(\frac{T_r}{100} \right)^4,$$

где ϵ_r — относительная излучательная способность или степень черноты газа, полученная путем отнесения энергии излучения газа E_r к количеству энергии излучения E_0 абсолютно черного тела при температуре газа.

Если углекислота и водяной пар содержатся в объеме одновременно, то степень черноты определяют из выражения

$$\epsilon_r = \epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \zeta - \Delta \epsilon g.$$

Степени черноты углекислоты CO_2 и водяного пара H_2O определяют по рис. 154 и 155.

Здесь ζ — поправочный коэффициент, учитывающий неодинаковую степень влияния толщины газового слоя s и парциального давления p на энергию излучения водяных паров, определяемый по рис. 156;

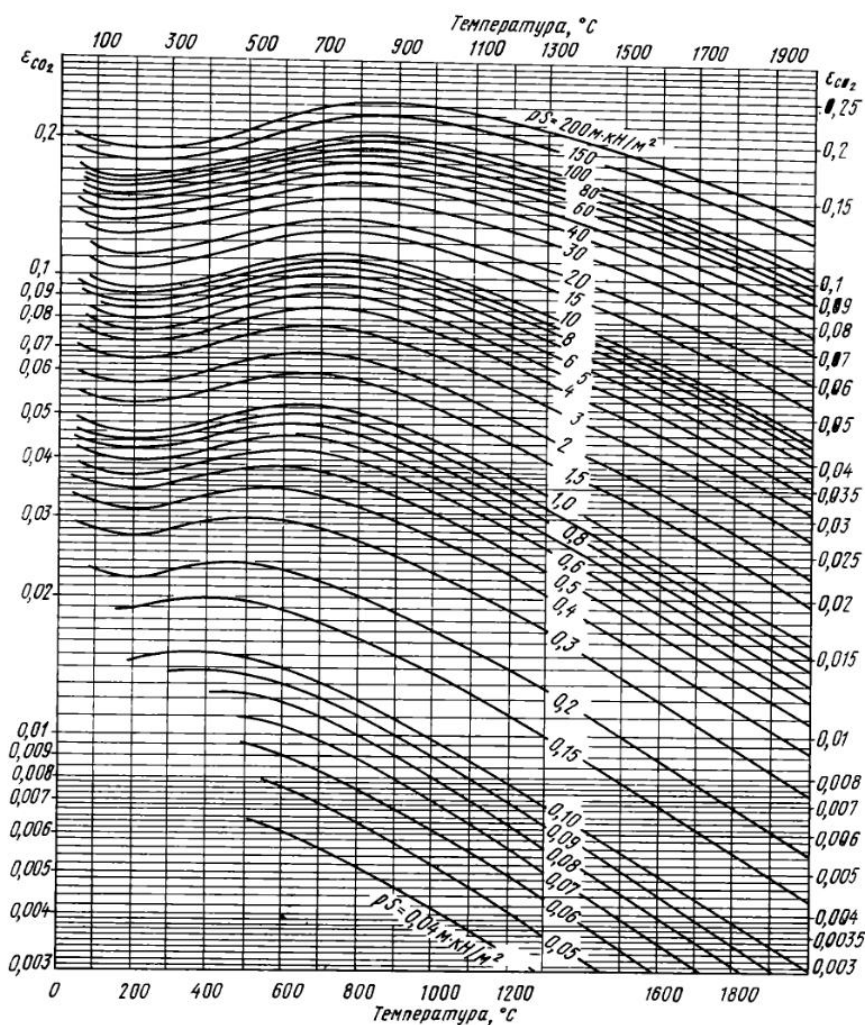


Рис. 154. Степень черноты углекислоты: CO_2

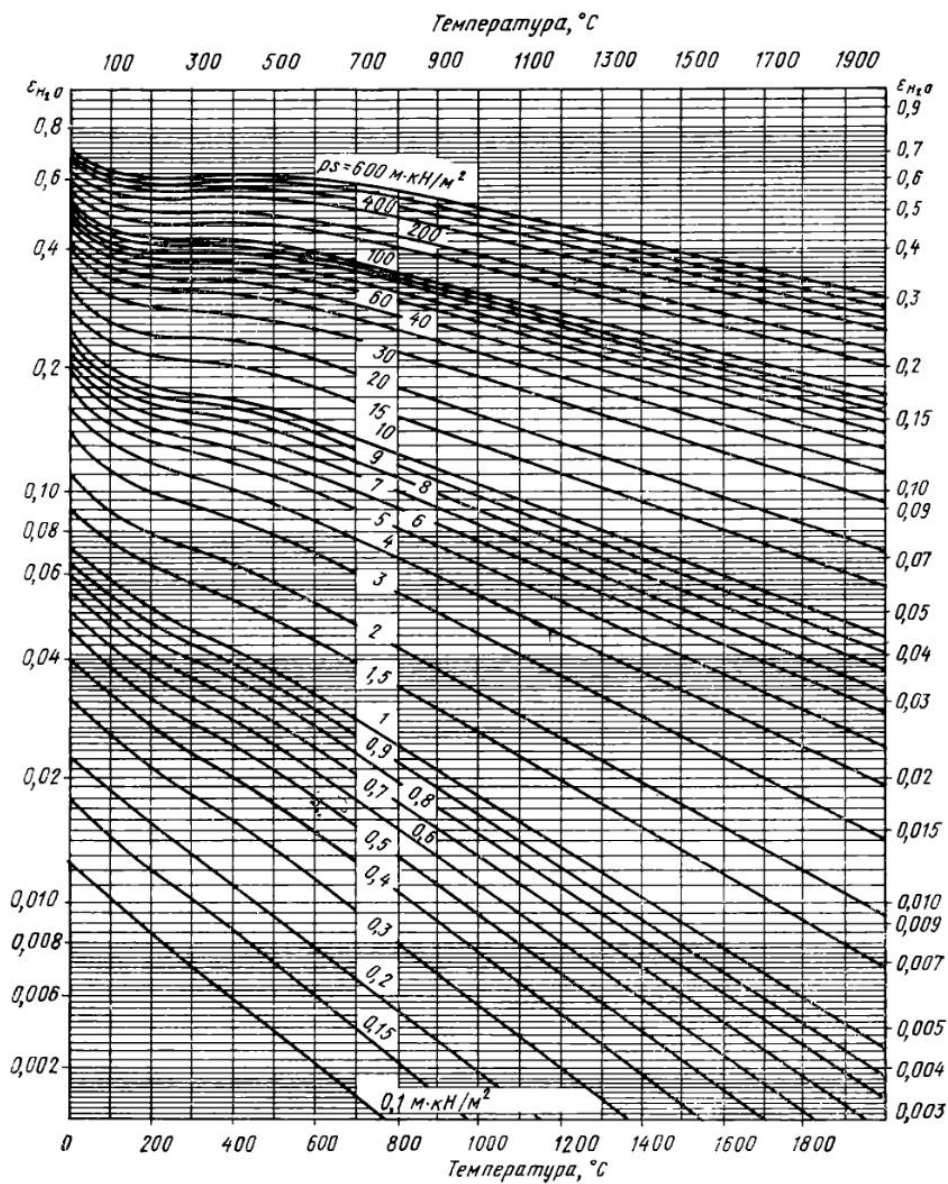


Рис. 155. Степень черноты водяного пара ϵ_{H_2O}

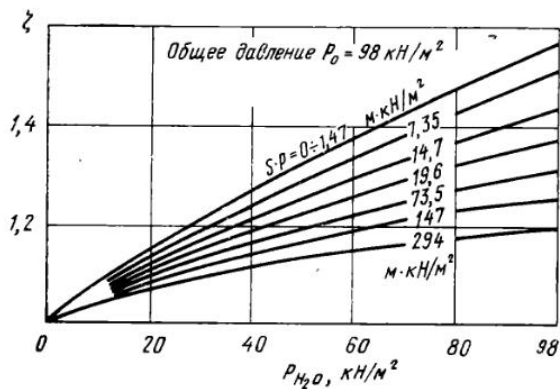


Рис. 156. Поправочный коэффициент ζ на парциальное давление для водяного пара (общее давление $P_0 = 98 \text{ кН/м}^2$)

$\Delta \epsilon g$ — поправка, учитывающая наложение полос излучения CO_2 и H_2O при их совместном пребывании в излучающем объеме, определяемая по рис. 157.

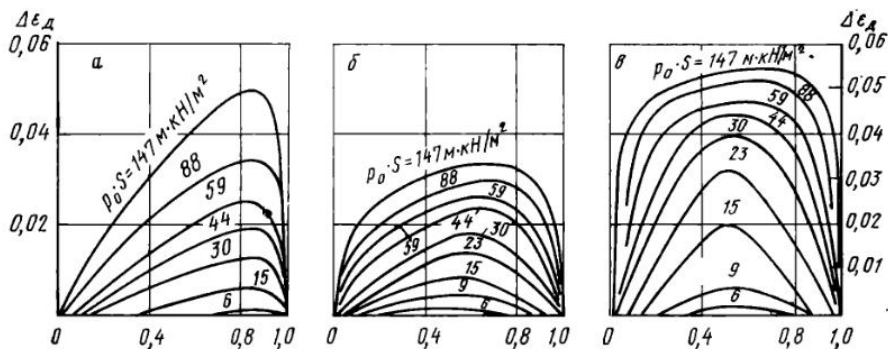


Рис. 157. Поправка на излучение смеси CO_2 и H_2O при $P_{\text{H}_2\text{O}} / (P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CO}_2})$ и различной температуре, °C: а — 125°C; б — 540°C; в — 930°C.

При обычных соотношениях компонентов, какие наблюдаются в дымовых газах, поправка $\Delta \epsilon g$ незначительна ($\sim 2-4\%$). Эту поправку следует учитывать лишь при очень точных расчетах и при больших значениях $\rho_0 \cdot s$, где ρ_0 — общее давление газа.

При определении степени черноты газа в объеме под s подразумевают эффективную длину луча, определяемую из выражения

$$s = \eta_r \frac{4V}{F} \text{ м,}$$

где η_r — коэффициент эффективности газового излучения, характеризующий ту долю излучаемой энергии, которая достигает стенок;

V — объем полости, заполненной излучающим газом, м^3 ;

F — площадь всех стенок, ограничивающих этот объем, м^2 .

В ориентировочных расчетах принимают $\eta_r = 0,9$. Для более точных расчетов η_r принимается по рис. 158 в зависимости от степени черноты газового объема, которая определяется по предварительному значению η_r .

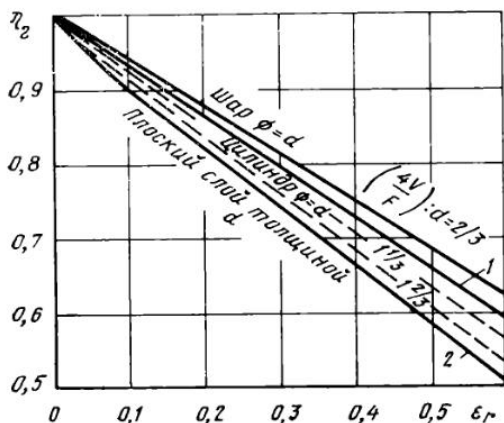


Рис. 158. Коэффициент эффективности η_r газового излучения в зависимости от формы газового объема и его степени черноты ϵ_r :

V — заполненный газом объем, м^3 ; F — суммарная площадь окружающих его поверхностей, м^2 ; d — наименьший поперечник заполненного газом объема, м

Ниже приведена эффективная длина лучей для газовых объемов различной формы, вычисленная при $\eta_r = 0,9$.

Эффективная длина лучей s для газовых объемов различной формы

Форма газового тела	S
Сфера диаметром d	$0,60d$
Куб со стороной a	$0,60a$
Цилиндр диаметром d , бесконечно длинный	$0,90d$
Цилиндр высотой $h=d$, излучение на боковую поверхность	$0,60d$
То же, излучение на центр основания	$0,77d$
Цилиндр $h = \infty$, основание — полукруг радиусом r , излучение на плоскую боковую поверхность	$1,26r$
Плоскопараллельный слой бесконечных размеров толщиной δ	$1,8\delta$
Пучок труб диаметром d с расстоянием между поверхностями труб x и при расположении труб:	
а) по треугольнику $x=d$	$2,8x$
б) по треугольнику $x=2d$	$3,8x$
в) по квадрату $x=d$	$3,5x$

Теплообмен между серыми телами в замкнутом пространстве, заполненном лучепоглощающей средой

При передаче тепла излучением в системе из двух серых тел, образующих замкнутое пространство, заполненное лучепоглощающей средой, математическое описание процессов встречает большие трудности. На практике такая задача встречается очень часто. Приведенные ниже формулы, полученные с некоторыми допущениями, позволяют рассчитывать такой случай теплообмена с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Введем обозначения: индекс «к» для параметров, относящихся к кладке (рис. 159); индекс «м» для параметров металла; индекс «г» для параметра заполняющего объем газа.

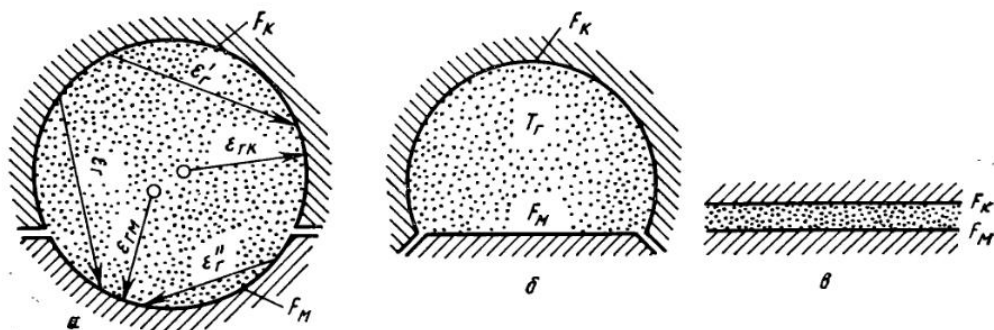


Рис. 159. Схема к передаче тепла излучением $T_k > T_m$; $T_g > T_k$; $T_g > T_m$

Количество тепла, переданного от кладки к металлу, от газа к кладке и т. д., определяется из выражений:

$$Q_{k.m} = (E_k F_k \varphi_{k.m} - E_m F_m \varphi_{m.k}) \epsilon_{k.m};$$

$$Q_{g.k} = (E_g - E_k) F_k \epsilon_{g.k};$$

$$Q_{g.m} = (E_g - E_m) F_m \epsilon_{g.m}.$$

Если предположить, что потери тепла кладкой компенсируются за счет передачи тепла к кладке конвекцией, то справедливы равенства:

$$Q_{g.k} = Q_{k.m};$$

$$Q_{g.m} + Q_{k.m} = Q_{g.m} + Q_{g.k} = Q_{g.k.m} = Q_m,$$

где

$$E_K = C_0 \left(\frac{T_K}{100} \right)^4;$$

$$E_M = C_0 \left(\frac{T_M}{100} \right)^4; \quad E_\Gamma = C_0 \left(\frac{T_\Gamma}{100} \right)^4; \quad C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Стоящие в формулах приведенные степени черноты определяют для различных случаев следующим образом.

I случай (см. рис. 159,а). $\varphi_{M.M} \neq 0$; $\varphi_{K.K} \neq 0$;

$$\varepsilon_{K.M} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}{A};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.K} = \frac{\varepsilon_K [1 - \varphi_{M.M} (1 - \varepsilon_\Gamma'') (1 - \varepsilon_M)] (\varphi_{K.K} \varepsilon_\Gamma' + \varphi_{K.M} \varepsilon_\Gamma)}{A} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_K \varphi_{K.M} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_M) (\varphi_{M.M} \varepsilon_\Gamma'' + \varphi_{M.K} \varepsilon_\Gamma)}{A};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.M} = \frac{\varepsilon_M [1 - \varphi_{K.K} (1 - \varepsilon_\Gamma') (1 - \varepsilon_K)] (\varphi_{M.M} \varepsilon_\Gamma'' + \varphi_{M.K} \varepsilon_\Gamma)}{A} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_M \varphi_{M.K} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_K) (\varphi_{K.K} \varepsilon_\Gamma' + \varphi_{K.M} \varepsilon_\Gamma)}{A};$$

$$A = [1 - \varphi_{K.K} (1 - \varepsilon_\Gamma') (1 - \varepsilon_K)] [1 - \varphi_{M.M} (1 - \varepsilon_\Gamma'') (1 - \varepsilon_M)] -$$

$$- \varphi_{K.M} \varphi_{M.K} (1 - \varepsilon_\Gamma)^2 (1 - \varepsilon_K) (1 - \varphi_M).$$

При $\varepsilon_\Gamma = \varepsilon_\Gamma' = \varepsilon_\Gamma''$:

$$\varepsilon_{K.M} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}{B}; \quad \varepsilon_{\Gamma.K} = \frac{\varepsilon_\Gamma \cdot \varepsilon_K}{B}; \quad \varepsilon_{\Gamma.M} = \frac{\varepsilon_\Gamma \cdot \varepsilon_M}{B};$$

$$B = [1 - \varphi_{K.K} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_K)] [1 - \varphi_{M.M} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_M)] -$$

$$- \varphi_{K.M} \varphi_{M.K} (1 - \varepsilon_\Gamma)^2 (1 - \varepsilon_K) (1 - \varepsilon_M);$$

$$\varepsilon_{\Gamma.K.M} = \frac{\varepsilon_\Gamma \varepsilon_M}{\varepsilon_\Gamma + \varphi_{K.M} \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}.$$

При $\varepsilon_\Gamma = \varepsilon_\Gamma' = \varepsilon_\Gamma'' = 0$:

$$\varepsilon_{K.M} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_M}{[1 - \varphi_{K.K} (1 - \varepsilon_K)] [1 - \varphi_{M.M} (1 - \varepsilon_M)] - \varphi_{K.M} \varphi_{M.K} (1 - \varepsilon_K) (1 - \varepsilon_M)}.$$

Температура кладки определится:

$$T_K^4 = T_M^4 + (T_\Gamma^4 - T_M^4) \frac{\varepsilon_\Gamma}{\varepsilon_\Gamma + \varphi_{K.M} \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}.$$

Количество тепла, полученное металлом:

$$Q_{мет} = (E_K - E_M) F_M \varepsilon_M.$$

II случай (см. рис. 159,б):

$$\varphi_{M.M} = 0; \quad \varphi_{M.K} = 1; \quad \varphi_{K.M} = \frac{F_M}{F_K}.$$

$$\varepsilon_{K.M} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}{D};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.K} = \frac{\varepsilon_\Gamma \varepsilon_K [1 + \varphi_{K.M} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_M)]}{D};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.М} = \frac{\varepsilon_{\Gamma} \varepsilon_{М} [1 + \varphi_{К.М} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) (1 - \varepsilon_{К})]}{D};$$

$$D = 1 - \varphi_{К.К} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) (1 - \varepsilon_{К}) - \varphi_{К.М} (1 - \varepsilon_{\Gamma})^2 (1 - \varepsilon_{К}) (1 - \varepsilon_{М});$$

$$\varepsilon_{\Gamma.К.М} = \frac{\varepsilon_{\Gamma} \varepsilon_{М} [1 + \varphi_{К.М} (1 - \varepsilon_{\Gamma})]}{\varepsilon_{\Gamma} + \varphi_{К.М} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) [1 - (1 - \varepsilon_{\Gamma}) (1 - \varepsilon_{М})]}.$$

При $\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon'_{\Gamma} = \varepsilon''_{\Gamma} = 0$:

$$\varepsilon_{К.М} = \frac{\varepsilon_{К} \varepsilon_{М}}{\varepsilon_{К} + \varphi_{К.М} \varepsilon_{М} (1 - \varepsilon_{К})} = \frac{\varepsilon_{К} \varepsilon_{М}}{1 - (1 - \varepsilon_{К}) (1 - \varphi_{К.М} \varepsilon_{М})};$$

$$T_{К}^4 = T_{М}^4 + (T_{\Gamma}^4 - T_{М}^4) \frac{1}{1 + \frac{\varphi_{К.М} \varepsilon_{М} (1 - \varepsilon_{\Gamma})}{\varepsilon_{\Gamma} [1 + \varphi_{К.М} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) (1 - \varepsilon_{М})]}};$$

$$Q_{мет} = (E_{К} - E_{М}) F_{М} \frac{\varepsilon_{М} [1 + \varphi_{К.М} (1 - \varepsilon_{\Gamma})]}{1 + \varphi_{К.М} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) (1 - \varepsilon_{М})}.$$

III случай (см. рис. 159, в). $\varphi_{К.К} = \varphi_{М.М} = 0$; $\varphi_{К.М} = \varphi_{М.К} = 1$:

$$\varepsilon_{К.М} = \frac{\varepsilon_{К} \varepsilon_{М} (1 - \varepsilon_{\Gamma})}{Ж};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.К} = \frac{\varepsilon_{\Gamma} \varepsilon_{К} [1 + (1 - \varepsilon_{\Gamma}) (1 - \varepsilon_{М})]}{Ж};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.М} = \frac{\varepsilon_{\Gamma} \varepsilon_{М} [1 + (1 - \varepsilon_{\Gamma}) (1 - \varepsilon_{К})]}{Ж};$$

$$Ж = 1 - (1 - \varepsilon_{\Gamma})^2 (1 - \varepsilon_{К}) (1 - \varepsilon_{М});$$

$$\varepsilon_{\Gamma.К.М} = \frac{\varepsilon_{\Gamma} \varepsilon_{М} (2 - \varepsilon_{\Gamma})}{1 - (1 - \varepsilon_{\Gamma})^2 (1 - \varepsilon_{М})}.$$

При $\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon'_{\Gamma} = \varepsilon''_{\Gamma} = 0$

$$\varepsilon_{К.М} = \frac{\varepsilon_{К} \varepsilon_{М}}{1 - (1 - \varepsilon_{К}) (1 - \varepsilon_{М})} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{К}} + \frac{1}{\varepsilon_{М}} - 1}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением

При расчетах теплоотдачи, происходящей совместно конвекцией и излучением, удобно пользоваться коэффициентом теплоотдачи лучеиспусканием:

$$\alpha_{л} = \frac{q_{12}}{t_1 - t_2} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}).$$

Коэффициент теплоотдачи показывает, какое количество тепла в килджоулях передается излучением с 1 м^2 (или на 1 м^2) поверхности тела в 1 ч при разности температур поверхностей, отдающей и воспринимающей тепло, равной 1°С .

Суммарное количество тепла, переданного излучением и конвекцией, равно

$$Q = Q_{л} + Q_{к} = \alpha (t_1 - t_2) F \cdot \tau \text{ кДж},$$

где $\alpha = \alpha_{к} + \alpha_{л}$.

Значения коэффициентов теплоотдачи приведены на рис. 160 в зависимости от температуры печи и температуры нагреваемого изделия и на рис. 161 для решетки регенераторов.

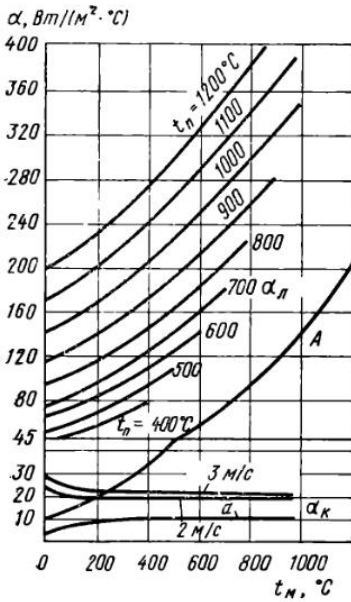


Рис. 160. Коэффициент теплоотдачи излучением α_r в зависимости от температуры кладки печи t_n ; конвекцией α_k в зависимости от скорости движения воздуха (a — неподвижный воздух); A — суммарный коэффициент теплоотдачи при охлаждении в спокойном воздухе; t_m — температура поверхности металла

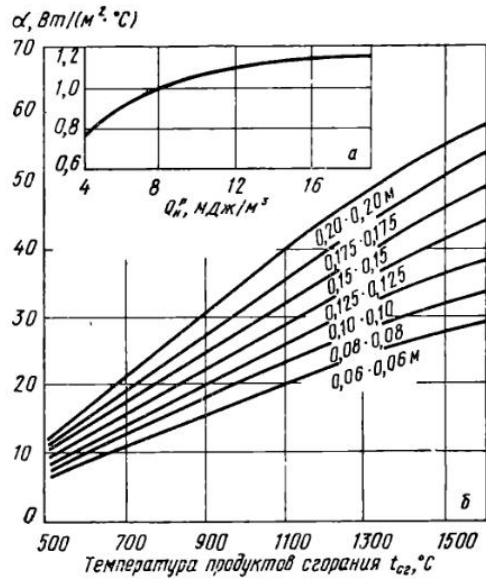


Рис. 161. Коэффициент теплоотдачи излучением в регенеративных решетках: a — поправка в зависимости от Q_n^p — теплоты сгорания смеси коксового и доменного газов

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

В сложных случаях теплообмена, при передаче тепла от одной среды к другой через разделительную стенку, тепловой поток определяют из выражения

$$q = K (t_r - t_n) \text{ Вт/м}^2,$$

где K — коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha'}} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Здесь α и α' — суммарные коэффициенты теплоотдачи с одной и другой сторон разделительной стенки;

s/λ — тепловое сопротивление.

Коэффициент теплопередачи K показывает, какое количество тепла в килоджоулях передается через 1 м^2 поверхности разделительной стенки от одной среды к другой при разности температур между ними в 1°C за 1 ч . Ориентировочно коэффициент теплопередачи K имеет следующие значения, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$, при теплопередаче:

От газа к газу	30	От конденсирующихся паров	
От газа к воде	60	к воде	3000
От керосина к воде	350	От конденсирующихся паров	
От воды к воде	1200	к маслам	350

Коэффициент теплопередачи для игольчатых рекуператоров можно подсчитывать как для оребренной поверхности.

НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТЕЛ

МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Основной задачей расчетов нагрева или охлаждения изделий является нахождение изменения температур во времени по сечению изделия. При нагреве по сечению изделия возникает перепад температур $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}$, т. е. разность между более прогретыми поверхностями $t_{\text{пов}}$ и менее нагретыми внутренними $t_{\text{ц}}$ слоями. Перепад температур в теле определяется тепловым сопротивлением изделия S/λ и зависит от условий нагрева: теплового потока q ; скорости нагрева $C_{\text{н}}$, коэффициента теплоотдачи α и др. Во многих случаях разность температур по сечению изделия оказывается столь незначительной, что в практических расчетах ее принимают равной нулю ($\Delta t \approx 0$ и $t_{\text{пов}} \approx t_{\text{ц}}$). Такие изделия называют «тонкими». «Тонкое» изделие характеризуется либо небольшой толщиной прогреваемого слоя S , либо очень высоким коэффициентом теплопроводности λ . Материалы ведут себя при нагреве как «тонкие» изделия при условии, что критерий Био, учитывающий отношение сопротивлений, имеет значения $\frac{\alpha S}{\lambda} \leq 0,25$. Если значения критерия Био $Bi \geq 0,50$, то тела в процессе нагрева ведут себя как «массивные изделия», для которых нельзя пренебрегать перепадом температур по сечению тела.

При нагреве и охлаждении изделий используют одинаковые математические зависимости, отличающиеся лишь знаком. При нагреве происходит поглощение тепла изделием ($+q$; $+Q$) и повышение его энтальпии ($+\Delta i$, $+\Delta I$), а при охлаждении — отдача тепла ($-q$; $-Q$) и понижение его энтальпии ($-\Delta i$; $-\Delta I$).

При нагреве массивных изделий распределение температур по сечению тела принимается по параболе II степени. Такое распределение температур строго справедливо для условий нагрева при постоянном тепловом потоке $q = \text{const}$ либо при постоянной скорости нагрева изделий $C_{\text{н}} = \text{const}$. При параболическом симметричном законе распределения температур в теле средняя по сечению температура определяется следующим образом:

для пластины

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{\Delta t}{3} = t_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \Delta t;$$

для цилиндра

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{\Delta t}{2} = t_{\text{пов}} - \frac{\Delta t}{2};$$

для шара

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{3}{5} \Delta t = t_{\text{пов}} - \frac{2}{5} \Delta t.$$

где $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}$.

В общем случае среднюю по сечению тела температуру определяют по формуле

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{\Delta t}{k_3} = t_{\text{пов}} - \left(1 - \frac{1}{k_3}\right) \Delta t;$$

$$\Delta t = q_{\text{ср}} \frac{s}{\lambda} = \frac{q_{\text{пов}} s}{k_2 \lambda},$$

где k_3 — коэффициент усреднения разности температур в теле (табл. XIII-1);

k_2 — коэффициент усреднения теплового потока по сечению тела;

$Bi=0$ — соответствует нагреву при условии $q_{\text{пов}} = \text{const}$.

$Bi=\infty$ — соответствует нагреву при условии $t_{\text{пов}} = \text{const}$.

Т а б л и ц а XIII-1

Значения коэффициентов усреднения температур k_3 и тепловых потоков k_2 в регулярном режиме при условии нагрева $t_{\text{пов}} = \text{const}$

$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda}$	Плита		Цилиндр		Шар	
	k_2	k_3	k_2	k_3	k_2	k_3
0	2	3	2	2	2	1,670
0,5	1,928	2,955	1,890	1,963	1,864	1,634
1,0	1,864	2,926	1,800	1,935	1,752	1,608
5,0	1,703	2,827	1,449	1,835	1,34	1,511
10	1,647	2,795	1,387	1,803	1,19	1,478
100	1,579	2,757	1,263	1,764	1,01	1,440
∞	1,5708	2,752	1,250	1,762	1,00	1,433

Толщину прогреваемого слоя S принимают равной половине толщины изделия при равномерном двустороннем нагреве. При одностороннем нагреве толщина прогреваемого слоя равна полной толщине изделия.

При несимметричном нагреве толщину прогреваемого слоя определяют из соотношения

$$S = \mu H,$$

где H — толщина изделия в направлении действия теплового потока, м;

$\mu = \frac{q_1}{q_1 + q_2}$ — коэффициент несимметричности нагрева

q_1 и q_2 — тепловые потоки на противоположные поверхности нагреваемого изделия.

При расчете процессов нагрева используют величины теплофизических свойств веществ: коэффициент теплопроводности λ Вт/(м·°С); коэффициент температуропроводности $a = \lambda/\rho c$ м²/ч; теплоемкость c кДж/(кг·°С); плотность ρ кг/м³ и коэффициент теплоотдачи α Вт/(м²·°С).

Значения этих параметров в формулах принимают постоянными, не зависящими от температуры. Чтобы учесть влияние температуры на теплофизические свойства вещества, в расчетах используют средние величины за интервал нагрева. В зависимости от того, каков характер изменения величины, применяют различные способы усреднения. Естественно, что определенные различными методами средние величины имеют неодинаковые значения и порой могут резко отличаться друг от друга (рис. 162).

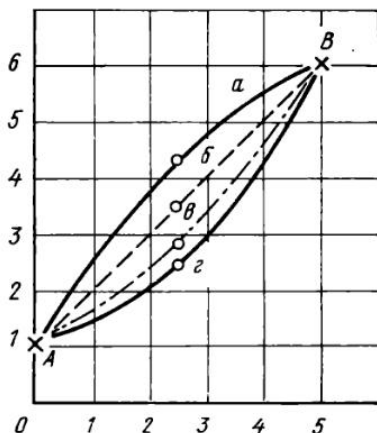
Чем больше интервалов нагрева, на которые разбивается весь процесс нагрева, тем ближе средние значения величин теплофизических

свойств к истинным, тем точнее расчет. Практически рекомендуется весь процесс нагрева разбивать не менее, чем на три интервала.

Усреднение коэффициента теплопроводности материала осуществляют по сечению (для температур поверхности $t_{пов}$ и оси $t_{ц}$) и во време-

Рис. 162. Усреднение двух величин A (0; 1) и B (5; 6) различными способами:

a — среднеквадратичное $\sqrt{\frac{A^2+B^2}{2}} = 4,30$; b — среднеарифметическое $\frac{A+B}{2} = 3,50$; c — среднелогарифмическое $\frac{B-A}{2, \frac{B}{A}} = 2,79$; z — среднегеометрическое $\sqrt{AB} = \sqrt[4]{A^2B^2} = 2,45$



ни (для τ_1 и τ_2). Таким образом, средний коэффициент теплопроводности определяется так:

$$\lambda_{ср} = \frac{1}{4} (\lambda_{t_{пов1}} + \lambda_{t_{ц1}} + \lambda_{t_{пов2}} + \lambda_{t_{ц2}}).$$

Средний по сечению тела тепловой поток находится по формуле

$$q_{ср} = \frac{q_{пов}}{k_2}$$

(значения k_2 см. в табл. XIII-1).

Теплоемкость в расчетах принимается средняя для крайних температур интервала нагрева. Усреднение выполняют либо по температурам поверхности $t_{пов}$, либо по средним температурам $t_{ср}$ изделия:

$$c_{пов} = \frac{\Delta i}{t_{пов.к} - t_{пов.н}} \quad \text{и} \quad c_{ср} = \frac{\Delta i}{t_{ср.к} - t_{ср.н}},$$

где индексы «н» и «к» относятся к температурам в начале и конце интервала нагрева:

$$\Delta i = i_k - i_n; \quad i_k = c_{0к}^t t_k; \quad i_n = c_{0н}^t t_n.$$

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ср}$ определяется как среднеарифметическое из значений для крайних точек интервала нагрева:

$$\alpha_{ср} = \frac{\alpha_n + \alpha_k}{2}.$$

Тепловой поток в интервале нагрева определяется как среднелогарифмическое из крайних значений, если они отличаются один от другого более чем в два раза:

$$q_{ср} = \frac{q_n - q_k}{2,3 \lg \frac{q_n}{q_k}};$$

в противном случае выполняют среднеарифметическое усреднение.

При выполнении точных расчетов необходимо знать характер залегания функции и в соответствии с этим выбирать способ усреднения величин (рис. 162).

В дальнейшем температура окружающей среды, в которой происходит нагрев или охлаждение изделия, обозначается через t_n . В зависимости от того, какое понятие вкладывается в эту величину — температура дымовых газов, эффективная температура печи, температура жидкой ванны или температура воздушной среды при охлаждении, определяют приведенный коэффициент излучения $C_{пр}$, тепловой поток q и коэффициент теплоотдачи α .

НАГРЕВ ТОНКИХ ИЗДЕЛИЙ

Нагрев тонких изделий в печи с постоянной температурой

Температура изделия в этом случае нагрева может быть определена по формуле

$$t = t_n - (t_n - t_n) \exp \left(- \frac{k_1 \alpha \tau}{S \rho c} \right) \text{ } ^\circ\text{C},$$

где k_1 — коэффициент материальной нагрузки, зависящий от формы тела, значения k_1 см. в табл. XIII-2.

Таблица XIII-2

Значения коэффициентов k_1 и k для различных форм тел

Форма тела	k_1	k	Форма тела	k_1	k
Прямоугольная призма бесконечной длины с отношением стороны B/S :			Цилиндр с отношением высоты к диаметру $H/2R$:		
1,00	1,70	0,294	1,00	2,49	0,200
1,25	1,41	0,355	1,25	2,14	0,233
1,50	1,22	0,409	1,50	2,04	0,245
1,75	1,14	0,438	∞	2,00	0,250
2,00	1,10	0,454	Куб	2,26	0,221
Бесконечно большая пластина	1,00	0,500	Шар	3,00	0,167

Время нагрева определяется по формуле (при преобладании конвекции)

$$\tau = \frac{S \rho c}{k_1 \alpha} 2,3 \lg \frac{t_n - t_n}{t_n - t_k} \text{ ч.}$$

Время нагрева может быть также определено из выражения (при преобладании излучения)

$$\tau = \frac{S \rho c}{k_1 C_{пр}} \frac{100}{\left(\frac{T_n}{100} \right)^3} \left[\psi \left(\frac{T_k}{T_n} \right) - \psi \left(\frac{T_n}{T_n} \right) \right] \text{ ч.}$$

где

$$\psi \left(\frac{T}{T_n} \right) = \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{T}{T_n}}{1 - \frac{T}{T_n}} + \frac{1}{2} \arctg \frac{T}{T_n}.$$

Значения функции $\psi (T/T_n)$ приведены в табл. XIII-3.

Значения функции $\psi(y) = \psi(T/T_n)$

y	$\psi(y)$	y	$\psi(y)$	y	$\psi(y)$	y	$\psi(y)$	y	$\psi(y)$
0,20	0,2000	0,42	0,4226	0,64	0,6639	0,84	0,9599	0,97	1,431
0,22	0,2201	0,44	0,4434	0,66	0,6882	0,86	1,0020	0,98	1,537
0,24	0,2402	0,46	0,4642	0,68	0,7132	0,88	1,0389	0,985	1,612
0,26	0,2602	0,48	0,4854	0,70	0,7389	0,90	1,1024	0,990	1,713
0,28	0,2803	0,50	0,5066	0,72	0,7655	0,91	1,1332	0,992	1,770
0,30	0,3005	0,52	0,5277	0,74	0,7936	0,92	1,1659	0,994	1,842
0,32	0,3207	0,54	0,5497	0,76	0,8229	0,93	1,2046	0,996	1,944
0,34	0,3409	0,56	0,5718	0,78	0,8538	0,94	1,2463	0,998	2,117
0,36	0,3612	0,58	0,5938	0,80	0,8864	0,95	1,2959	0,999	2,293
0,38	0,3816	0,60	0,6166	0,82	0,9224	0,96	1,3563	0,9995	2,465
0,40	0,4012	0,62	0,6400						

Нагрев тонких изделий в печи с переменной температурой

При изменении температуры печи по закону прямой линии:

$$t_n = t_{n.н} + \theta \tau,$$

где θ — скорость роста температуры печи.

Температура изделия t определится по формуле

$$t = t_{n.н} + \theta \tau - \theta \frac{1}{m} - \left(t_{n.н} - t_n - \theta \frac{1}{m} \right) \exp(-m \tau),$$

где t_n — начальная температура изделия и $m = \alpha k_1 / S \rho c$.

При $m\tau \geq 4$ можно пользоваться следующими формулами:

$$t = t_{n.н} + \theta \tau - \theta \frac{S \rho c}{k_1 \alpha}$$

$$и \quad t_n - t = \theta \frac{S \rho c}{k_1 \alpha}.$$

НАГРЕВ МАССИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ**Методы расчетов нагрева, основанные на решении основного дифференциального уравнения теплопроводности**

В твердых телах передача тепла происходит посредством теплопроводности. Если при передаче тепла в теле не происходит изменения температур во времени: $dt/d\tau = 0$, то тепловое состояние называют стационарным. При нестационарном тепловом состоянии $dt/d\tau \neq 0$, температура тела меняется во времени, происходит изменение энтальпии тела. Такие процессы связаны с нагревом или охлаждением тел. Аналитическая зависимость изменения температуры и количества переданного тепла во времени для любой точки тела может быть получена на основании решения основного дифференциального уравнения теплопроводности, которое в декартовой системе координат имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 t,$$

где ∇^2 — дифференциальный оператор Лапласа.

В цилиндрической системе координат уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right).$$

Для получения однозначного решения уравнения теплопроводности его необходимо решать совместно с уравнениями краевых условий, состоящих из: а) начальных условий; б) поверхностных или граничных условий.

Существует четыре способа задания поверхностных условий:

1) поверхностные условия первого рода, когда задано распределение температур на поверхности тела, как функция времени: $t_{\text{пов}} = f_1(\tau)$;

2) поверхностные условия второго рода, когда задан тепловой поток: $q = f_2(\tau)$;

3) поверхностные условия третьего рода, когда задан закон изменения температуры окружающей среды: $t_{\text{п}} = f_3(\tau)$ и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой;

4) поверхностные условия четвертого рода характеризуют условия теплообмена тела с окружающей средой по закону теплопроводности.

Поверхностные условия I рода

а. Постоянная температура поверхности тела

Для поверхностных условий I рода, когда задано изменение температуры поверхности тела во времени, общее решение одномерной задачи для плиты бесконечных размеров имеет следующий вид:

$$t = \varphi(\tau) + \frac{1}{S} \sum_{l=1}^S \cos \delta_l \frac{x}{S} \exp\left(-\delta_l^2 \frac{a\tau}{S^2}\right) \int_{-S}^{+S} \times \\ \times [F(x) - \varphi_0] \cos \delta_l \frac{x}{S} dx - 2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+1}}{\delta_l} \cos \delta_l \times \\ \times \frac{x}{S} \exp\left(-\delta_l^2 \frac{a\tau}{S^2}\right) \int_0^{\pi} \exp\left(\delta_l^2 \frac{a\tau}{S^2}\right) \varphi'(\tau) d\tau.$$

Здесь:

изменение температуры t в точках $x = \pm S$ во времени задано функцией $\varphi(\tau)$, т. е. поверхностные условия

$$t_{x = \pm S} = \varphi(\tau);$$

в начальный момент нагрева при $\tau = 0$ температура по сечению тела задана функцией $F(x)$, т. е. начальные условия

$$t_{\tau=0} = F(x);$$

l — нормальный ряд чисел, $l = 1, 2, 3, \dots$;

$$\delta_l = \frac{2l-1}{2} \pi;$$

S — толщина прогреваемого слоя;

x — текущая координата точки, для которой определяется температура t ;

τ — время;

a — коэффициент температуропроводности;

$a\tau/S^2 = Fo$ — критерий Фурье.

Экспоненция x равна $\exp x = e^x$.

Аналогичное решение в общем виде для сплошного цилиндра бесконечной длины радиусом R выражается следующим образом:

$$t = \varphi(\tau) + \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_1^2(\mu_n)} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) \times \\ \times \int_0^R [F(r) - \varphi(0)] J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) r dr - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} \times \\ \times J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) \int_0^{\tau} \exp\left(\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) \varphi'(\tau) d\tau,$$

где r — текущий радиус точек, для которых определяется температура;

$J_0(\mu_n)$ и $J_1(\mu_n)$ — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;

$\frac{a\tau}{R^2} = Fo$ — критерий Фурье.

Ниже приведены решения, графики и формулы для частных решений дифференциального уравнения при конкретных случаях задания начальных условий и поверхностных условий I рода.

I случай. При мгновенном изменении температуры на поверхности бесконечно большой пластины до $t_{пов}$ и равномерном распределении температуры в начальный момент, т. е. $t_{x=\pm S} = t_H = \text{const}$ и $t_{\tau=0} = t_H = \text{const}$, решение имеет вид:

$$\vartheta = \frac{t_{пов} - t}{t_{пов} - t_H} = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{l+1}}{\delta_l} \cos \delta_l \frac{x}{S} \exp\left(-\delta_l^2 \frac{a\tau}{S^2}\right),$$

или, будучи выражено в общей форме,

$$\vartheta = \frac{t_{пов} - t}{t_{пов} - t_H} = \Phi\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right),$$

где t — искомая температура;

ϑ — безразмерная температура.

Графически приведенное уравнение представлено на рис. 163,а.

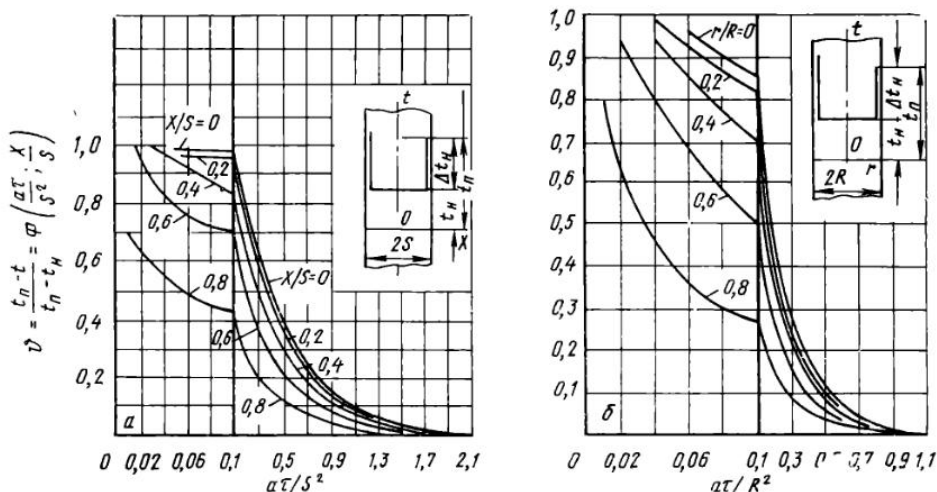


Рис. 163. Безразмерная температура $\vartheta = \frac{t_{пов} - t}{t_{пов} - t_H}$ (I случай):

а — для пластины; б — для цилиндра

Для аналогичных условий решение для бесконечного цилиндра радиусом R имеет вид:

$$\frac{t_{\text{пов}} - t}{t_{\text{пов}} - t_{\text{н}}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) = \Phi_1\left(\frac{a\tau}{R^2}; \frac{r}{R}\right).$$

Значения безразмерной температуры ϑ для цилиндра бесконечной длины представлены на рис. 163, б.

При значениях $Fo > 0,06$ для плиты и $Fo > 0,08$ для цилиндра безразмерные температуры можно вычислять по следующим формулам: для плиты толщиной $2S$

$$\vartheta = \frac{t_{\text{пов}} - t}{t_{\text{пов}} - t_{\text{н}}}; \quad \vartheta = 1,27 \exp\left(-2,47 \frac{a\tau}{S^2}\right);$$

для цилиндра радиусом R

$$\vartheta = 1,61 \exp\left(-5,76 \frac{a\tau}{R^2}\right);$$

для цилиндра радиусом R и высотой $2H$

$$\vartheta = 2,05 \exp\left(-2,47 \frac{a\tau}{H^2} - 5,76 \frac{a\tau}{R^2}\right);$$

для призмы сечением $2S \times 2B$

$$\vartheta = 1,61 \exp\left[-2,47 \left(\frac{a\tau}{S^2} + \frac{a\tau}{B^2}\right)\right];$$

для параллелепипеда $2S \times 2B \times 2L$

$$\vartheta = 2,05 \exp\left[-2,47 \left(\frac{a\tau}{S^2} + \frac{a\tau}{B^2} + \frac{a\tau}{L^2}\right)\right].$$

Здесь $\exp x = e^x$.

Относительные температуры при значении симплекса $x/S = 0$ представлены на рис. 164 для тел различной формы.

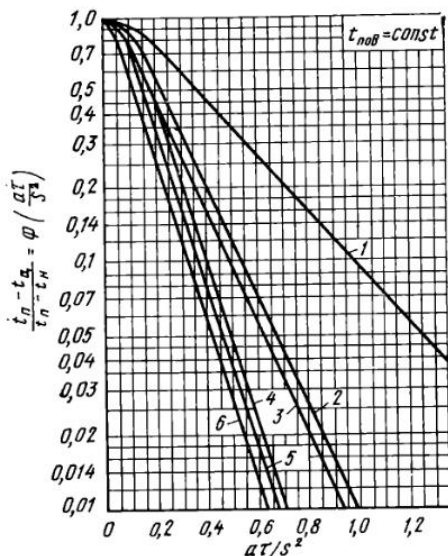


Рис. 164. Значения функции $\Phi = \left(\frac{a\tau}{S^2}\right)$ при нагреве $t_{\text{пов}} = \text{const}$ для различных форм тела при $\frac{x}{S} = 0$:

1 — плита; 2 — квадратный брус; 3 — цилиндр; 4 — куб; 5 — цилиндр высотой H ; 6 — шар

II случай. Постоянная температура на поверхности тела при параболическом распределении температур в начальный момент (выравнивание температур):

$$t_{\tau=0} = F(x) = t_{н.ц} + \Delta t_n \frac{x^2}{S^2};$$

$$t_{x=\pm S} = \varphi(\tau) = t_{пов},$$

где $\Delta t_n = t_{пов} - t_{н.ц}$,

$t_{пов}$ — значение температуры на поверхности тела.

Решение задачи для безразмерной температуры

$$\vartheta = \frac{t_{пов} - t}{t_{пов} - t_{н.ц}} = \frac{\Delta t'}{\Delta t_n} = \Phi_2 \left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right)$$

для пластины, бесконечно большой длины и ширины представлено графически на рис. 165,а и для цилиндра бесконечной длины на рис. 165,б.

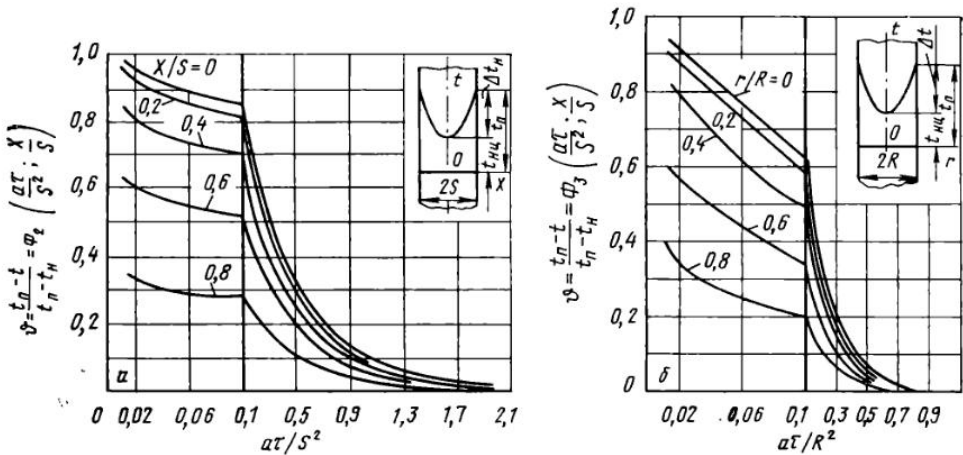


Рис. 165. Безразмерная температура $\vartheta = \frac{t_{пов} - t}{t_{пов} - t_{нач}}$ при

постоянной температуре

поверхности (II случай):

а — для пластины; б — для цилиндра

Здесь $\Delta t'$ — разность температур между поверхностью и точкой, имеющей координату x или r . Полный перепад температур $\Delta t = t_{пов} - t_{ц}$ может быть определен по рис. 166, где представлена зависимость

$$\delta = \frac{\Delta t}{\Delta t_n} = \Phi \left(\frac{a\tau}{S^2} \right).$$

При $\frac{a\tau}{S^2} > 0,06$ для пластины и $\frac{a\tau}{R^2} > 0,08$ для цилиндра расчет выравнивания температур можно вести по следующим формулам: для пластины толщиной $2S$

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_n} = 1,03 \exp \left(-2,47 \frac{a\tau}{S^2} \right);$$

для цилиндра

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_n} = 1,11 \exp \left(-5,76 \frac{a\tau}{R^2} \right);$$

для цилиндра радиусом R и высотой $2H$

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_n} = 1,14 \exp \left(-2,47 \frac{a\tau}{H^2} - 5,76 \frac{ax}{R^2} \right).$$

Необходимая температура печи $t_{\text{п}}$ и тепловой поток q при выравнивании температур определяются из выражений:
 для пластины бесконечной длины и ширины

$$\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{н.ц}}} = \frac{\lambda}{\alpha S} F\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}\right); \quad q = \frac{\lambda \Delta t_{\text{н.т}}}{S} F\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}\right);$$

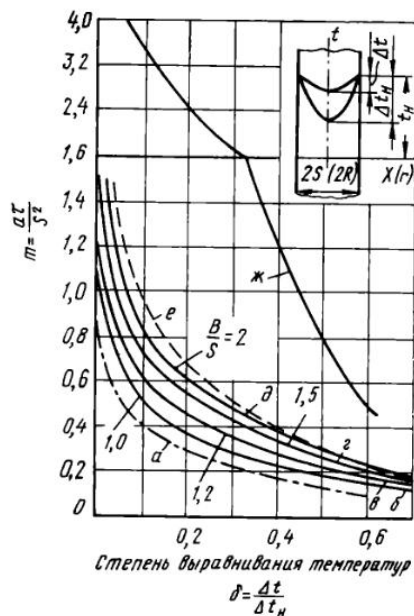


Рис. 166. График для определения продолжительности выдержки:
 а — цилиндр; б — призма (B и S — стороны призмы); е — пластина; ж — в томительной зоне методической печи

для цилиндра бесконечной длины

$$\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{н.ц}}} = \frac{\lambda}{\alpha R} F\left(\frac{\alpha \tau}{R^2}\right);$$

$$q = \frac{\lambda \Delta t_{\text{н.т}}}{R} F\left(\frac{\alpha \tau}{R^2}\right).$$

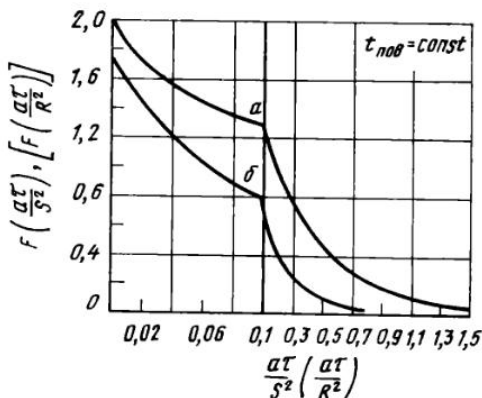


Рис. 167. Функция F для температур печи и теплового потока при постоянной температуре поверхности:
 а — пластина; б — цилиндр

Значения функций F приведены на рис. 167.

III случай. Мгновенное изменение температуры поверхности тела при параболическом распределении температур в начальный момент. Краевые условия:

$$t_{\tau=0} = F(x) = t_{\text{н.ц}} + \Delta t_{\text{н.т}} \frac{x^2}{S^2}; \quad t_{x=\pm S} = \Phi(\tau) = t_{\text{пов}};$$

где начальная разность температур в теле

$$\Delta t_{\text{н.т}} = t_{\text{пов. н}} - t_{\text{н.ц}}; \quad \Delta t_{\text{пов}} = t_{\text{пов}} - t_{\text{пов. н}}.$$

Текущая температура определяется из выражений:
 для пластины бесконечной длины и ширины

$$t = t_{\text{пов}} - \Delta t_{\text{пов}} \Phi\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right) - \Delta t_{\text{н.т}} \Phi_2\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right),$$

функция Φ определяется по рис. 163, а, а функция Φ_2 — по рис. 165, а; для цилиндра бесконечной длины

$$t = t_{\text{пов}} - \Delta t_{\text{пов}} \Phi_1\left(\frac{\alpha \tau}{R^2}; \frac{r}{R}\right) - \Delta t_{\text{н.т}} \Phi_3\left(\frac{\alpha \tau}{R^2}; \frac{r}{R}\right),$$

функция Φ_1 определяется по рис. 163, б, а функция Φ_3 — по рис. 165, б.

б. *Линейное изменение температуры поверхности тела*

1 случай. Линейное изменение температуры поверхности тела, т. е. нагрев тела при постоянной скорости C_H и равномерном распределении температур в начальный момент. Краевые условия запишутся:

$$t_{x=\pm s} = t_H + C_H \tau; \quad t_{\tau=0} = t_H = F(x).$$

Решение в общем виде имеет вид:

для пластины бесконечной длины и ширины

$$\frac{t - t_{\text{пов}}}{C_H \tau} = \Phi \left(\frac{a \tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right),$$

$$\text{где } t_{\text{пов}} = t_H + C_H \tau;$$

для цилиндра бесконечной длины

$$\frac{t - t_{\text{пов}}}{C_H \tau} = \Phi \left(\frac{a \tau}{R^2}; \frac{r}{R} \right).$$

Функции Φ в зависимости от критерия Фурье и безразмерных координат точек представлены на рис. 168 и 169.

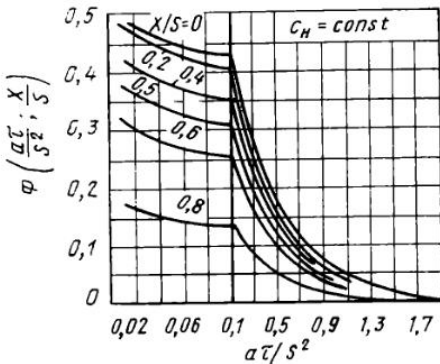


Рис. 168. Функции $\Phi \left(\frac{a \tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right)$ для пластины при линейном изменении температуры поверхности

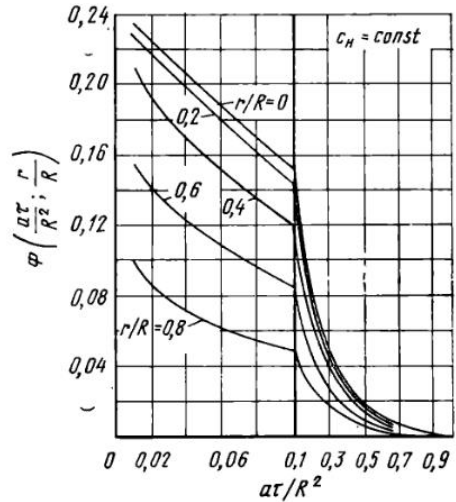


Рис. 169. Функции $\Phi \left(\frac{a \tau}{R^2}; \frac{r}{R} \right)$ для цилиндра при линейном изменении температуры поверхности

При $\frac{a \tau}{S^2} \geq 1$ для пластины бесконечной длины и ширины можно пользоваться следующими формулами:

$$t = t_H + C_H \tau + \frac{C_H S^2}{2a} \left(\frac{x^2}{S^2} - 1 \right);$$

$$t_{\text{ц}} = t_H + C_H \tau - \frac{C_H S^2}{2a};$$

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{C_H S^2}{2a}; \quad t = t_{\text{пов}} + \Delta t_{\text{max}} \left(\frac{x^2}{S^2} - 1 \right);$$

для цилиндра бесконечной длины при $\frac{a \tau}{R^2} \geq 0,5$

$$t = t_H + C_H \tau + \frac{C_H R^2}{4a} \left(\frac{r^2}{R^2} - 1 \right); \quad t_{\text{ц}} = t_H + C_H \tau - \frac{C_H R^2}{4a};$$

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{C_H R^2}{4a}; \quad t = t_{\text{пов}} + \Delta t_{\text{max}} \left(\frac{r^2}{R^2} - 1 \right).$$

II случай. Линейное изменение температуры поверхности при параболическом распределении температур в начальный момент. Краевые условия:

$$t_{x=\pm S} = t_{\text{пов. н}} + C_n \tau; \quad t_{\tau=0} = t_{\text{ц. н}} + \Delta t_n \frac{x^2}{S^2}.$$

Формулы для определения параметров в процессе нагрева имеют следующий вид для тел различной формы:

$$t = t_{\text{пов. н}} + C_n \tau + k \frac{C_n S^2}{a} \left(\frac{x^2}{S^2} - 1 \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{k C_n S^2}{a} - \Delta t_n \right) \Phi \left(\frac{a \tau}{S^2} \frac{x}{S} \right),$$

где k — коэффициент формы, значения которого приведены в табл. XIII-2; функцию Φ берут по рис. 168 или 169 в зависимости от формы тела;

t — температура в точке тела с координатой x или r ;

$$\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = \Delta t_{\text{max}} - \frac{1}{k} (\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_n) \Phi;$$

$$\Delta t_{\text{max}} = k C_n S^2 / a,$$

Φ берут по рис. 168 или 169 для $x/S=0$ и $r/R=0$.

Тепловой поток

$$q = C_n S c \gamma (2k - \Phi) + \frac{1}{k} \Delta t_n \frac{\lambda}{S} \Phi,$$

где Φ — функция, значения которой приведены на рис. 170.

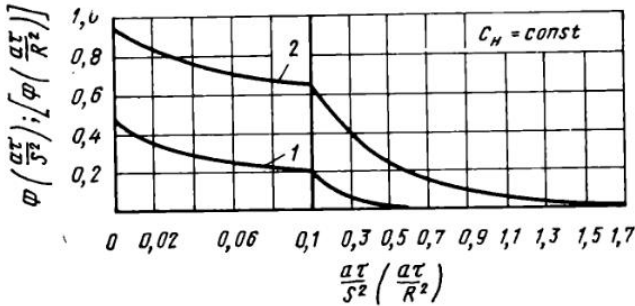


Рис. 170. Функции $\Phi \left(\frac{a \tau}{S^2} \right)$ для температур печи и теплового потока при линейном изменении температуры поверхности:

1 — цилиндра бесконечной длины; 2 — пластины

При $\tau > 2k \frac{S^2}{a}$ можно пользоваться формулами

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{пов. н}} + C_n \tau - k \frac{C_n S^2}{a}; \quad \Delta t = k \frac{C_n S^2}{a};$$

$$q = 2k C_n S c \gamma.$$

Поверхностные условия II рода

Решение уравнения теплопроводности при поверхностных условиях второго рода, т. е. при заданном тепловом потоке, который принимается за постоянную величину $q_{x=\pm S} = \text{const}$; $t_{\tau=0} = 0$, имеет следующий вид:

для пластины бесконечной длины и ширины

$$t = \frac{q S}{2 \lambda} \left[\frac{2 a \tau}{S^2} + \left(\frac{x}{S} \right)^2 - \frac{1}{3} + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{4 (-1)^{l+1}}{\varepsilon_l^2} \times \right. \\ \left. \times \cos \varepsilon_l \frac{x}{S} \exp \left(-\varepsilon_l^2 \frac{a \tau}{S^2} \right) \right],$$

где $\varepsilon_l = \pi l$ ($l=1, 2, 3, \dots$).

Это решение в общем виде запишется:

$$t \frac{2\lambda}{qS} = F\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right).$$

Значения функции F представлены на рис. 171.

Для значений $\frac{a\tau}{S^2} \geq 0,3$ формулы принимают вид:

$$t = \frac{qS}{2\lambda} \left[\frac{2a\tau}{S^2} + \left(\frac{x}{S}\right)^2 - \frac{1}{3} \right]; \quad t_{\text{пов}} = \frac{qS}{2\lambda} \left(\frac{2a\tau}{S^2} + \frac{2}{3} \right);$$

$$t_{\text{ц}} = \frac{qS}{2\lambda} \left(\frac{2a\tau}{S^2} - \frac{1}{3} \right);$$

$$\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = \frac{qS}{2\lambda}; \quad t_{\text{ср}} = t_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \Delta t = t_{\text{ц}} + \frac{1}{3} \Delta t.$$

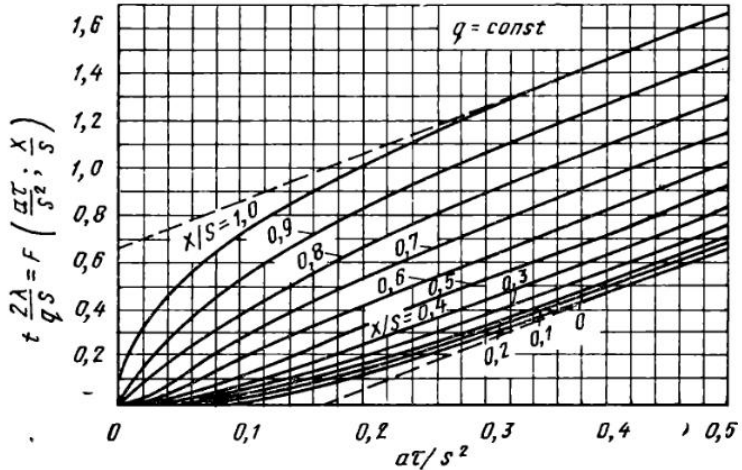


Рис. 171. Функция $F\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right)$ для условия нагрева $q = \text{const}$.

Для последней точки начального участка

$$t'_{\text{пов}} = 1,27 \Delta t = 1,27 \frac{qS}{2\lambda}; \quad t'_{\text{ц}} = t'_{\text{пов}} - \frac{qS}{2\lambda} = 0,27 \Delta t.$$

Время нагрева

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{2} \frac{S^2}{a \Delta t} \left(t_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \Delta t \right) = \frac{S\rho c}{q} \left(t_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \frac{qS}{2\lambda} \right) = \\ &= \frac{S\rho c t_{\text{ср}}^{\text{к}}}{q} = \frac{S\rho \Delta t}{q}. \end{aligned}$$

Для цилиндра бесконечной длины при $\frac{a\tau}{R^2} \geq 0,25$ расчетные формулы имеют вид:

$$t = \frac{qR}{2\lambda} \left[\frac{4a\tau}{R^2} + \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{1}{2} \right]; \quad t_{\text{пов}} = \frac{qR}{2\lambda} \left(\frac{4a\tau}{R^2} + \frac{1}{2} \right);$$

$$t_{\text{ц}} = \frac{qR}{2\lambda} \left(\frac{4a\tau}{R^2} - \frac{1}{2} \right); \quad \Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = \frac{qR}{2\lambda};$$

$$t_{\text{ср}}^{\text{к}} = t_{\text{ц}} + \frac{1}{2} \Delta t = t_{\text{пов}} - \frac{1}{2} \Delta t;$$

$$\tau = \frac{R\rho c}{2q} \left(t_{\text{пов}} - \frac{1}{2} \frac{qR}{2\lambda} \right) = \frac{R\rho c}{2q} t_{\text{ср}}^{\text{к}} = \frac{R\rho \Delta t}{2q}.$$

Для последней точки начального участка, т. е. при $\tau' = 0,25 \frac{R^2}{a}$,

$$t'_{\text{пов}} = 1,5 \frac{qR}{2\lambda}; \quad t'_{\text{ц}} = t'_{\text{пов}} - \frac{qR}{2\lambda} = 0,5 \frac{qR}{2\lambda}.$$

Поверхностные условия III рода

Постоянная температура окружающей среды

Общее решение уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода, т. е. при заданной температуре окружающей среды для пластины бесконечной длины и ширины толщиной $2S$ при симметричном распределении температур в начальный момент, имеет следующий вид:

$$t = \varphi(\tau) + \frac{x}{S} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\eta_l}{\eta_l + \sin \eta_l \cos \eta_l} \cos \eta_l \frac{x}{S} \exp \times \\ \times \left(-\eta_l^2 \frac{a\tau}{S^2} \right) \int_{-S}^{+S} [F(x) - \varphi(0)] \cos \eta_l \frac{x}{S} dx - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2 \sin \eta_l}{\eta_l + \sin \eta_l \cos \eta_l} \times \\ \times \cos \eta_l \frac{x}{S} \exp \left(-\eta_l^2 \frac{a\tau}{S^2} \right) \int_0^{\tau} \exp \left(\eta_l^2 \frac{a\tau}{S^2} \right) \varphi'(\tau) d\tau.$$

I случай. Для пластины, имеющей в начальный момент одинаковую температуру по всему сечению, и нагреваемой в печи с постоянной температурой, т. е. для краевых условий

$$t_{\tau=0} = t_n \quad \text{и} \quad \frac{\partial t}{\partial x_{x=\pm S}} = \pm h(t_n - t),$$

решение имеет вид:

$$t = t_n + (t_n - t_n) \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2 \sin \eta_l}{\eta_l + \sin \eta_l \cos \eta_l} \cos \eta_l \frac{x}{S} \exp \left(-\eta_l^2 \frac{a\tau}{S^2} \right),$$

или в общем виде

$$\vartheta = \frac{t - t_n}{t_n - t_n} = F \left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S} \right).$$

Значения функций F в зависимости от критериев $a\tau/S^2$ и $\alpha S/\lambda$ приведены на рис. 172—176 для различных значений симплекса x/S .

Для цилиндра бесконечной длины решение в общем виде

$$\frac{t - t_n}{t_n - t_n} = F \left(\frac{a\tau}{R^2}; \frac{\alpha R}{\lambda}; \frac{r}{R} \right).$$

Значения функций F в зависимости от критериев $a\tau/R^2$ и $\alpha R/\lambda$ приведены на рис. 179—183 для различных значений симплекса r/R .

Аналогичные графики для шара приведены на рис. 184 и 185.

Разность температур поверхности и середины пластины в общем виде

$$\frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}}{t_n - t_n} = \frac{\Delta t}{t_n - t_n} = F \left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda} \right)$$

представлена на рис. 186,а и для цилиндра бесконечной длины на рис. 186,б.

II случай. Нагрев в печи с постоянной температурой тела, имеющего перепад температур по сечению в начальный момент времени.

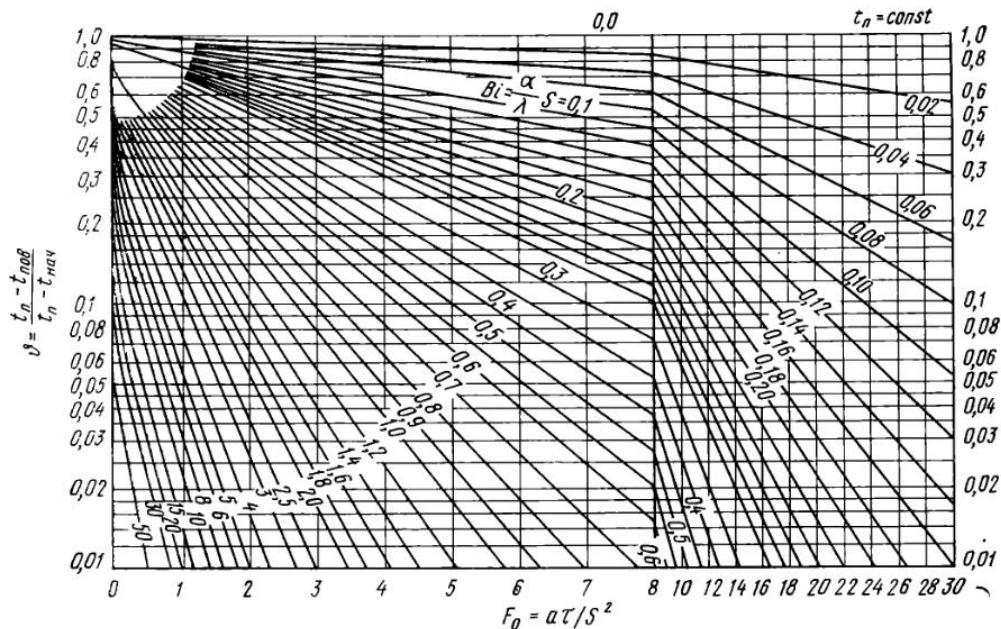


Рис. 172. Вспомогательный график для расчета нагрева или охлаждения поверхности пластины ($x/S =$

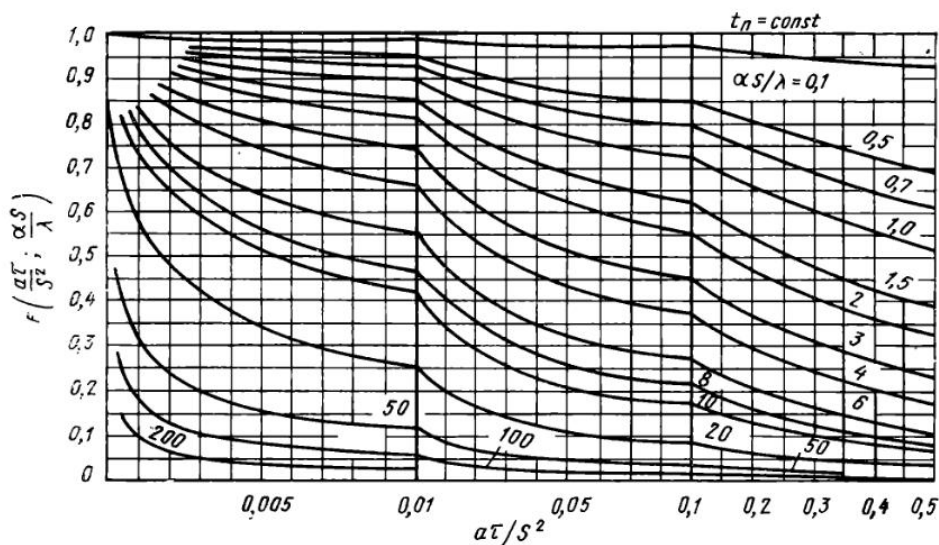


Рис. 173. Функции $F\left(\frac{\alpha\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}\right)$ для поверхности пластины при малых значениях Fo

Краевые условия для этого случая запишутся:

$$t_{\tau=0} = t_{\text{ц.н}} + \Delta t_{\text{н}} \frac{x^2}{S^2};$$

$$\frac{\partial t}{\partial x_{x=\pm S}} = \pm h (t_{\text{п}} - t),$$

где

$$\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{пов. и}} - t_{\text{ц.н}}; \quad h = \frac{\alpha}{\lambda}.$$

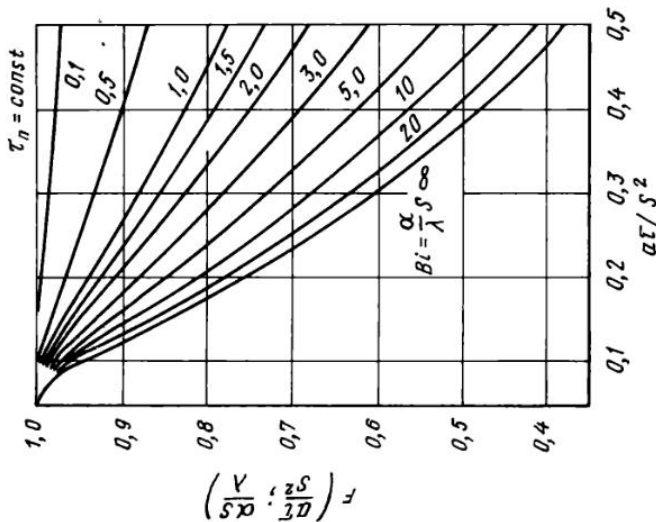


Рис. 175. Функции $F\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}\right)$ для середины пластины при малых значениях F_0

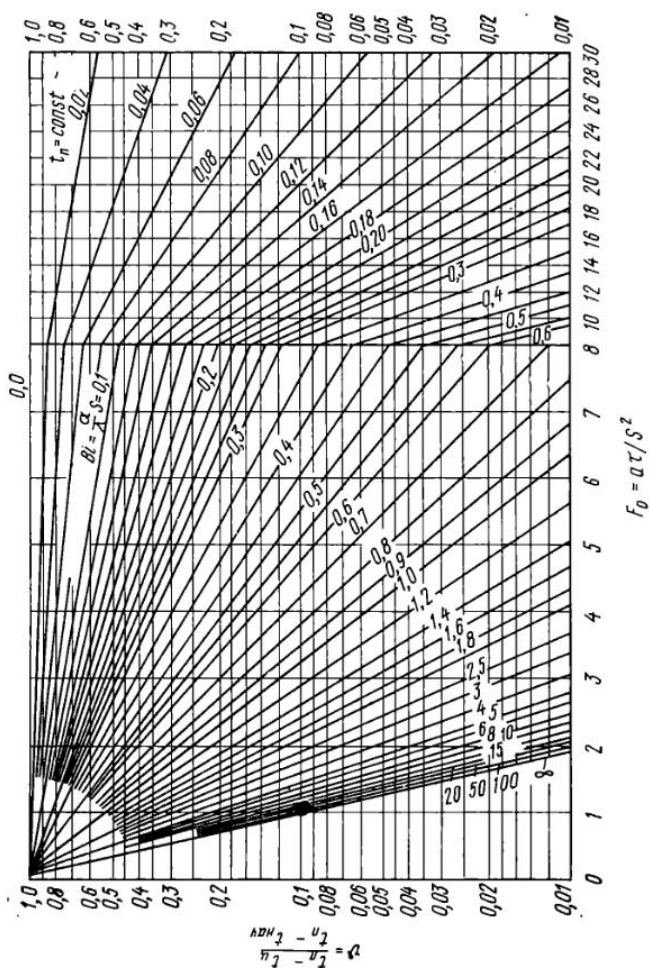


Рис. 174. Вспомогательный график для расчета нагрева или охлаждения средней плоскости пластины ($x/S=0$)

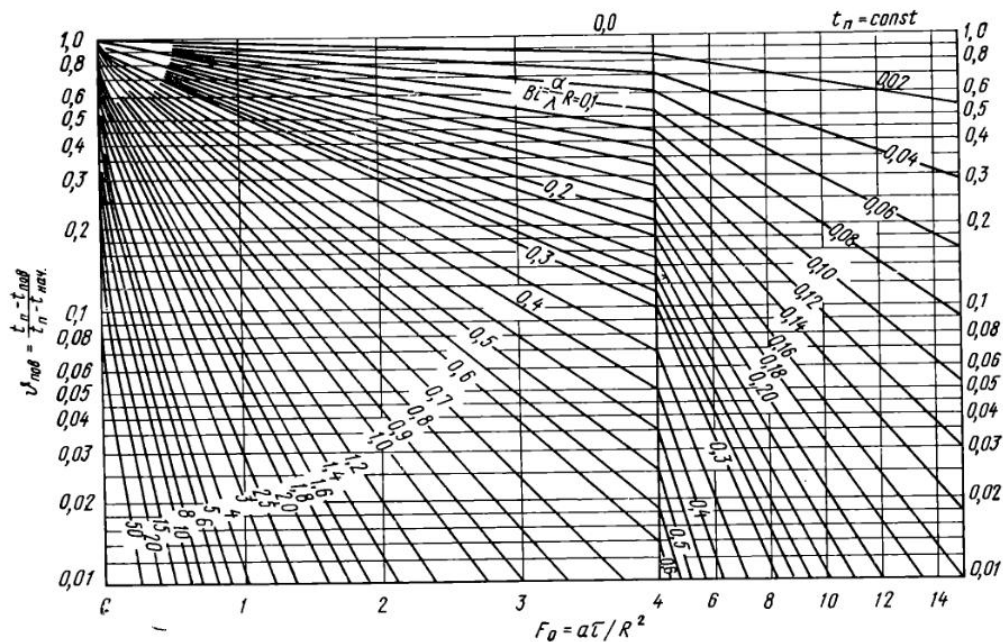


Рис. 176. Вспомогательный график для расчета нагрева или охлаждения поверхности цилиндра

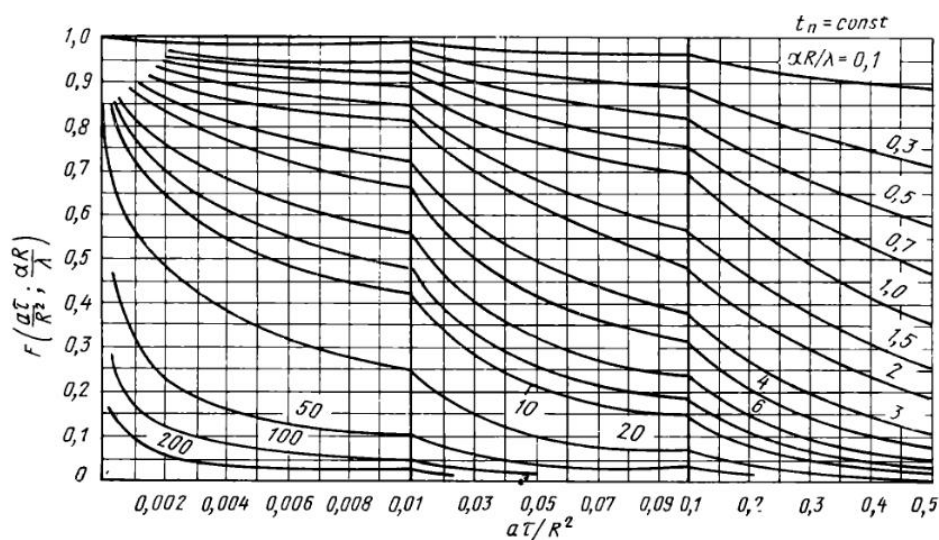


Рис. 177. Функции $F\left(\frac{\alpha\tau}{R^2}; \frac{\alpha R}{\lambda}\right)$ для поверхности цилиндра при малых значения Fo

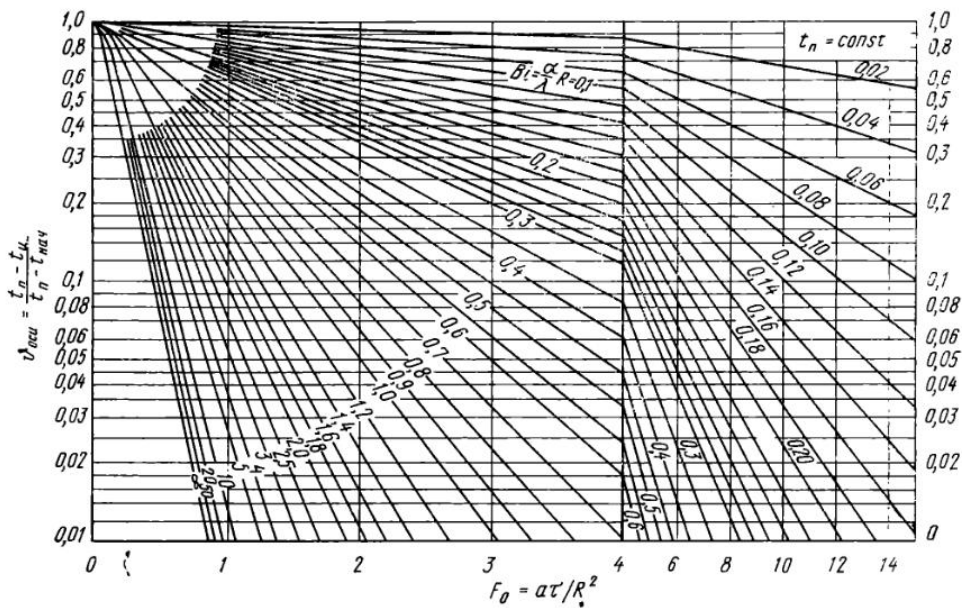


Рис. 178. Вспомогательный график для расчета нагрева или охлаждения оси цилиндра

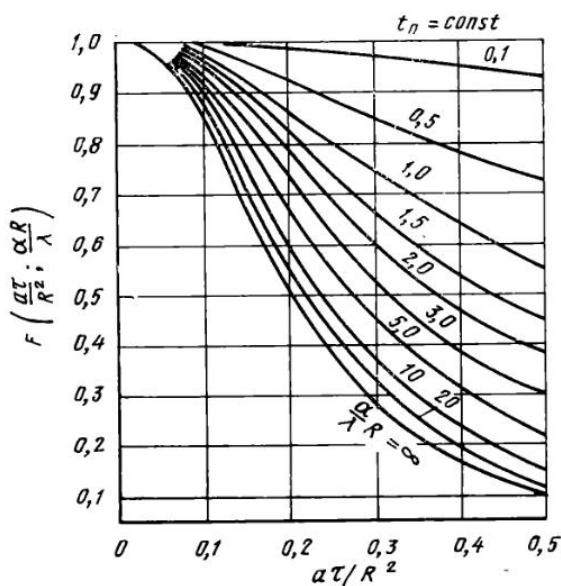


Рис. 179. Функция $\left(\frac{\alpha \tau}{R^2}; \frac{\alpha R}{\lambda}\right)$ для середины цилиндра при малых значениях критерия Фурье

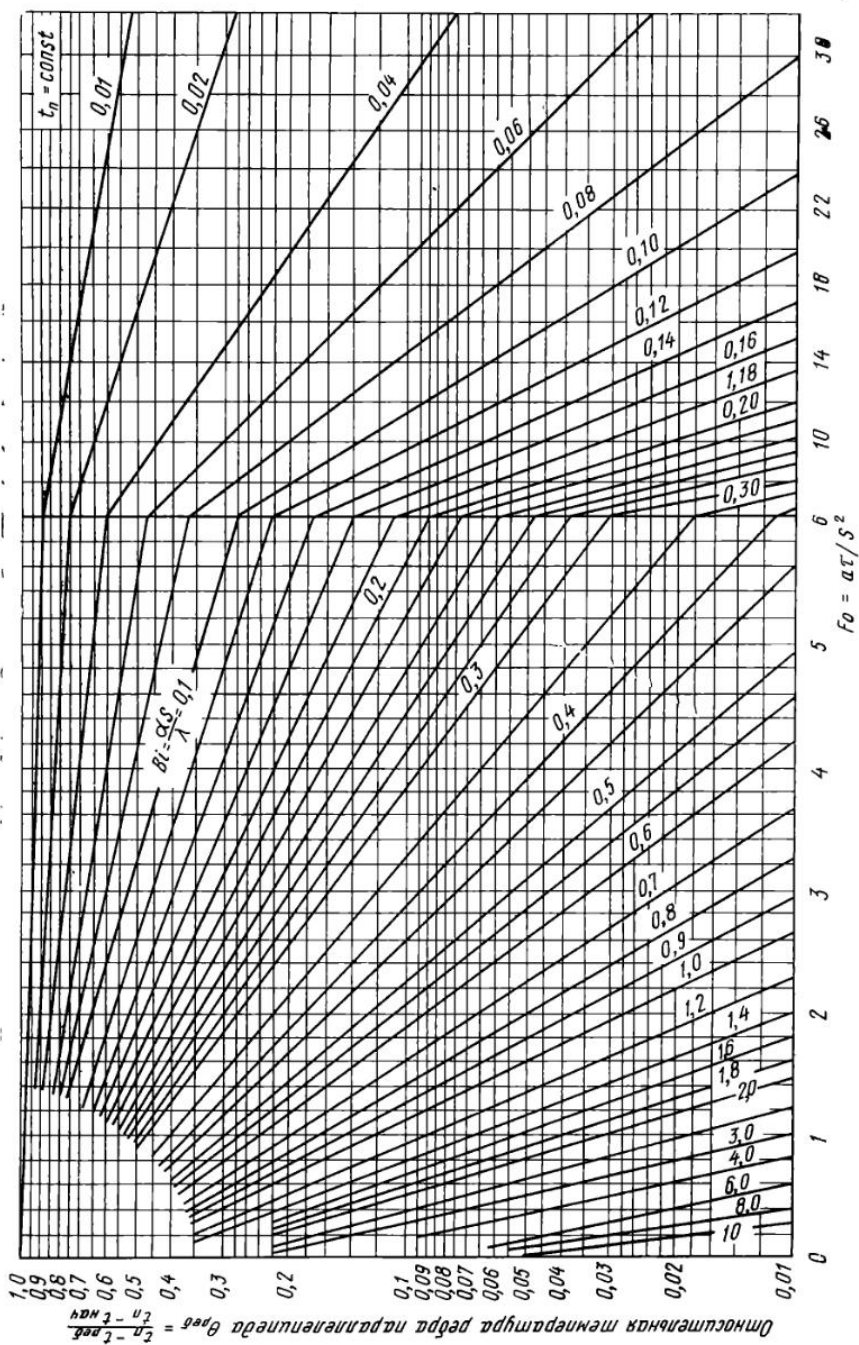


Рис. 180. Относительная температура для ребра неограниченного параллелепипеда квадратного сечения при $Bi = \text{const}$, $Bi_{\text{усл}} = \text{const}$ и $t_n = t_{\text{ред}}(t) = \text{const}$

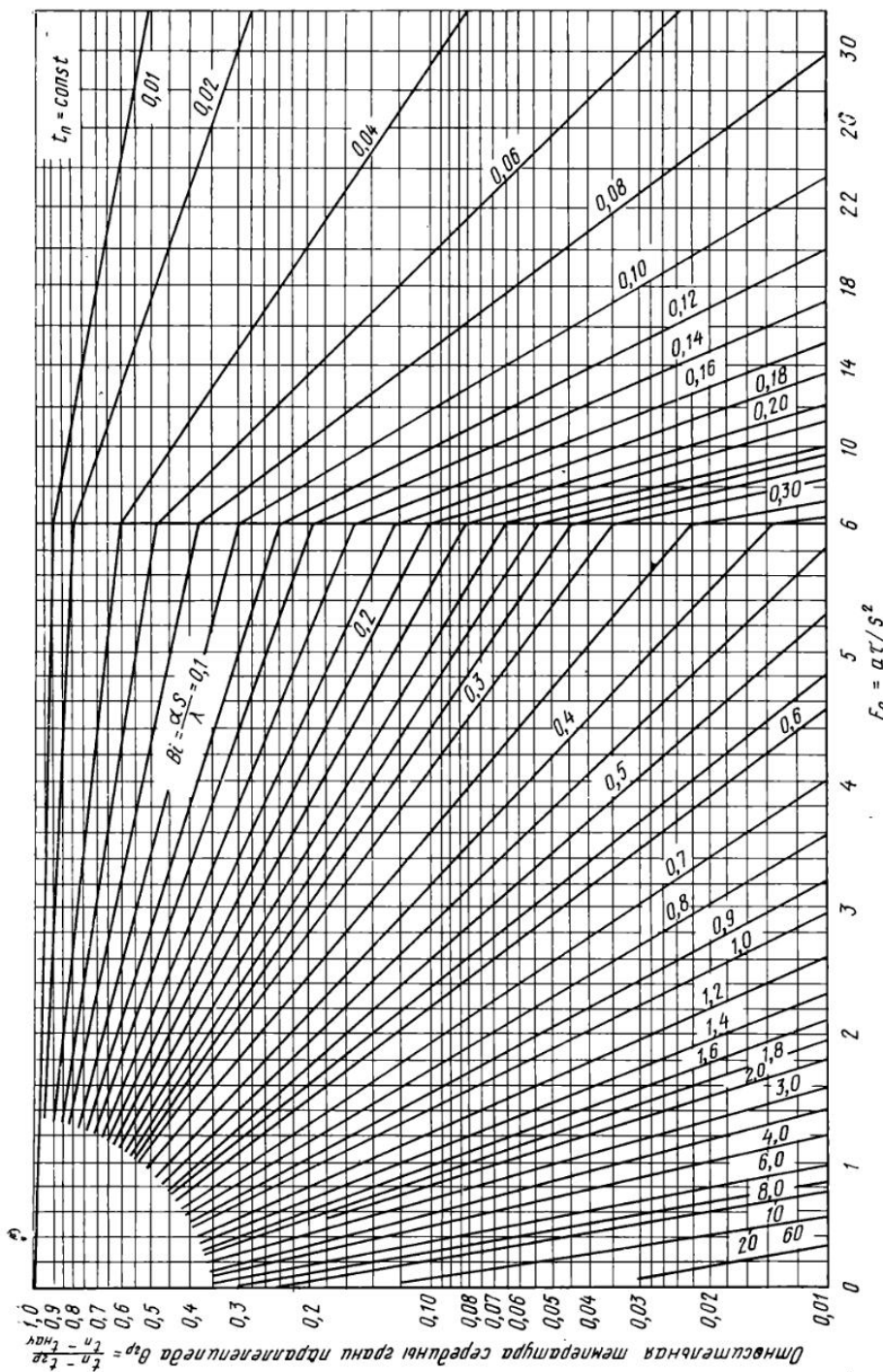


Рис. 181. Относительная температура середины грани неограниченного параллелепипеда квадратного сечения при $Bi = \text{const}$, $Bi_{\text{усл}} = \text{const}$ и $t_n = f(\tau) = \text{const}$

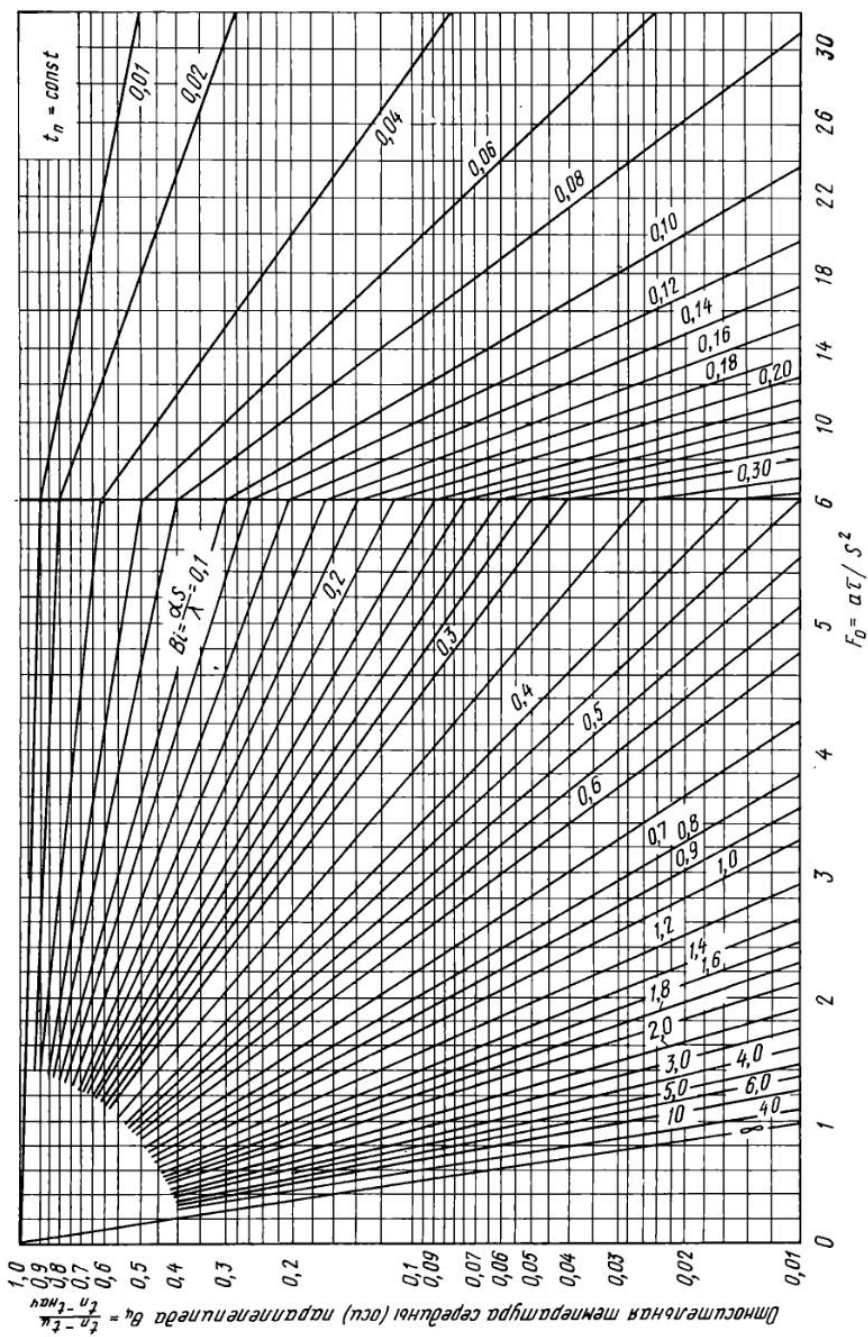


Рис. 182. Относительная температура середины (оси) неограниченного параллелепипеда квадратного сечения при $Bi = \text{const}$ ($Bi_{\text{удл}} = \text{const}$) и $t_n = f_n(\tau) = \text{const}$

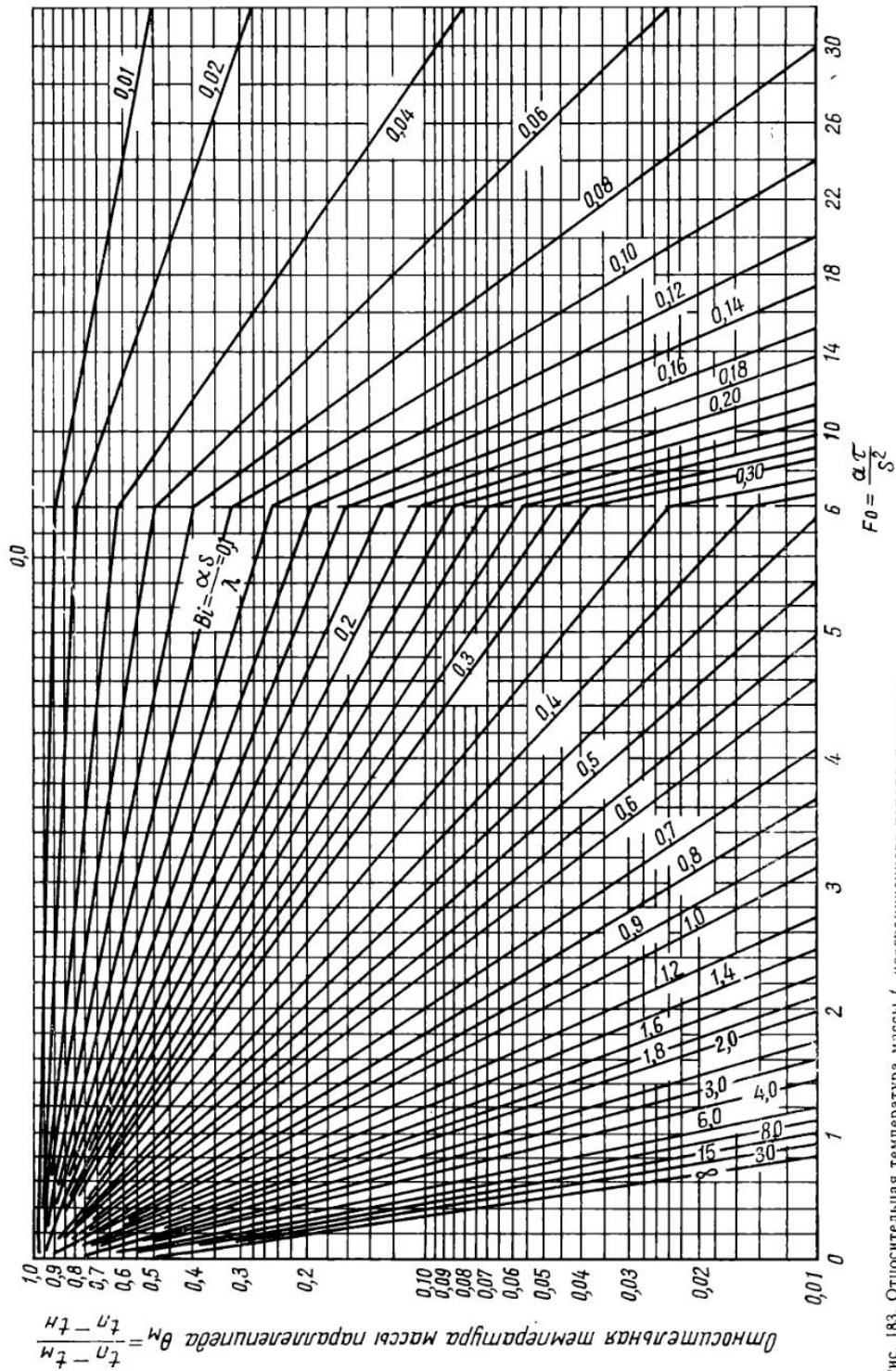


Рис. 183. Относительная температура массы t неограниченного параболического сечения при $Bi = \text{const}$, $Bi_{\text{уд}} = \text{const}$ и $t_{\text{н}} = t_{\text{г}} (\tau) = \text{const}$

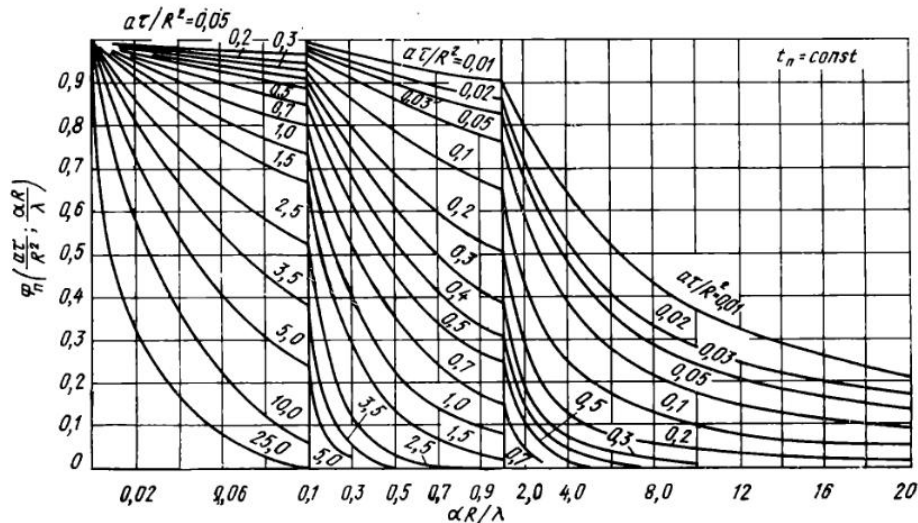


Рис. 184. Относительная температура поверхности шара

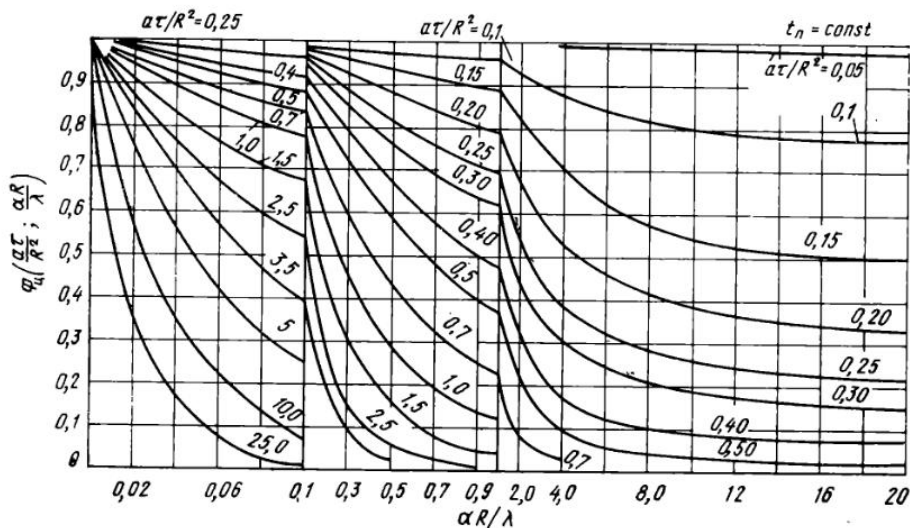


Рис. 185. Относительная температура центра шара

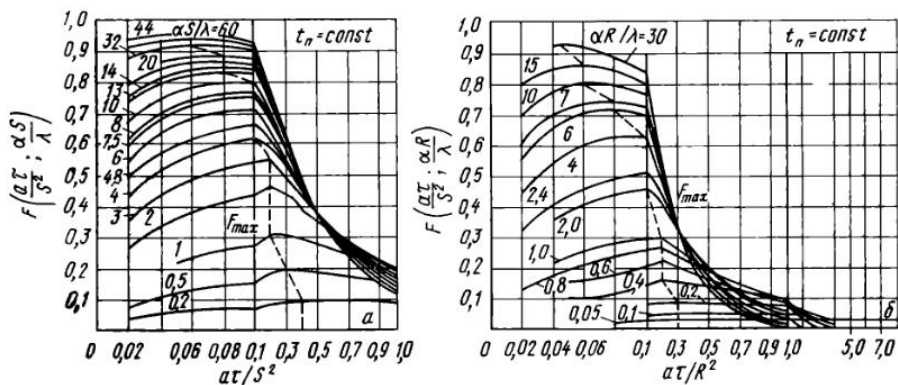


Рис. 186. Функции $F \left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda} \right)$ для разности температур:
 а — в пластине; б — в цилиндре

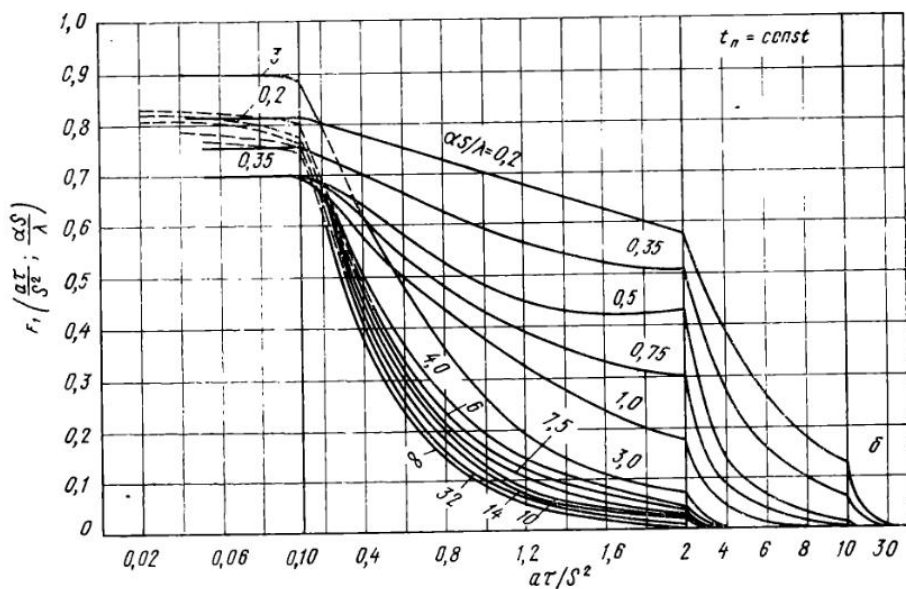
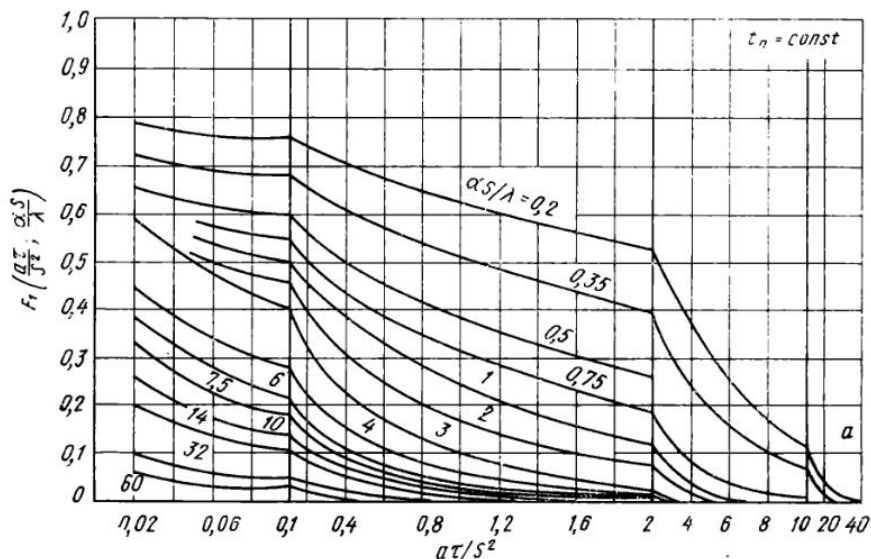


Рис. 187. Функции $F_1\left(\frac{\alpha\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}\right)$ для пластины при различных значениях x/S :

а—1; б—0

Решение в общем виде для пластины бесконечной длины и ширины имеет вид

$$t = t_n + (t_{\text{пов. н}} - t_n) F\left(\frac{\alpha\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S}\right) - \Delta t_n F_1\left(\frac{\alpha\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S}\right).$$

Значения функции F_1 для $\frac{x}{S} = 0$ и $\frac{x}{S} = 1$ представлены на рис. 187, а, б, а значения функций F — на рис. 172—175.

Для цилиндра бесконечной длины можно пользоваться этим же выражением, заменив S на R , функции F_1 находятся по рис. 188, а, б, а функции F по рис. 178—183.

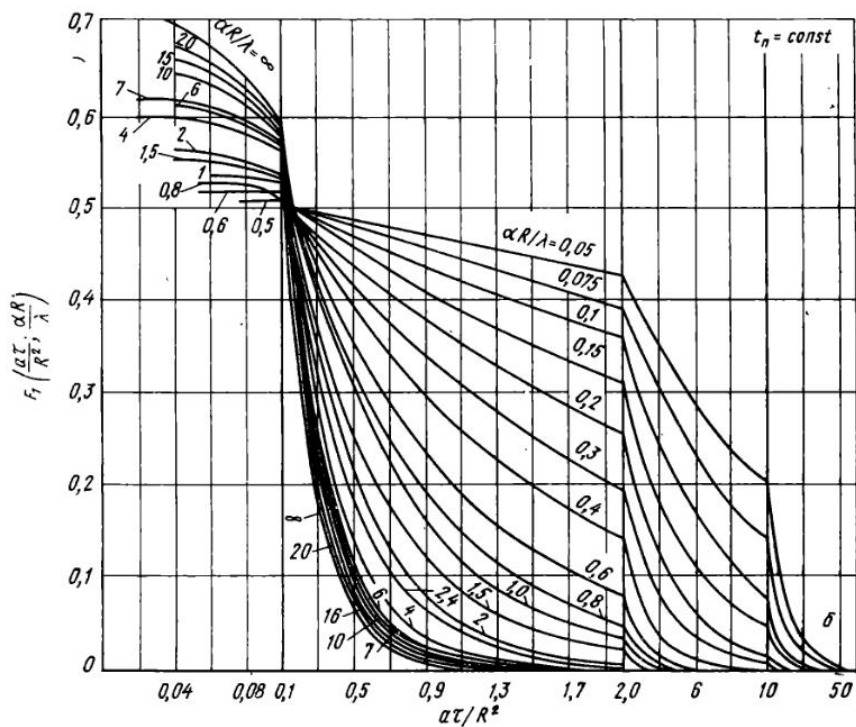
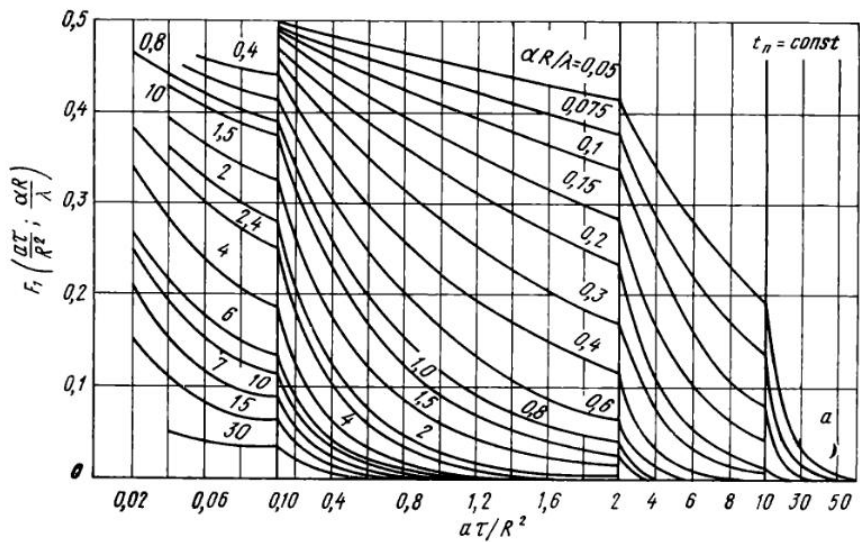


Рис. 188. Функции $F_1 \left(\frac{\alpha \tau}{R^2}; \frac{\alpha R}{\lambda} \right)$ для цилиндра при различных значениях r/R :

$a - 1$; $b - 0$

При нагреве тел ограниченных размеров — призмы прямоугольного сечения, прямоугольного параллелепипеда, короткого цилиндра — значения температурного критерия получают, перемножив функции: для призмы сечением $2B \times 2S$

$$\frac{t - t_n}{t_{н.сп} - t_n} = F\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S}\right) F\left(\frac{\alpha \tau}{B^2}; \frac{\alpha B}{\lambda}; \frac{y}{B}\right);$$

для параллелепипеда размерами $2B \times 2S \times 2L$

$$\frac{t - t_n}{t_{н.сп} - t_n} = F\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S}\right) F\left(\frac{\alpha \tau}{B^2}; \frac{\alpha B}{\lambda}; \frac{y}{B}\right) \times \\ \times F\left(\frac{\alpha \tau}{L^2}; \frac{\alpha L}{\lambda}; \frac{z}{L}\right);$$

для цилиндра с размерами $2R \times 2L$

$$\frac{t - t_n}{t_{н.сп} - t_n} = F\left(\frac{\alpha \tau}{R^2}; \frac{\alpha R}{\lambda}; \frac{r}{R}\right) F\left(\frac{\alpha \tau}{L^2}; \frac{\alpha L}{\lambda}; \frac{z}{L}\right).$$

Значения функций F принимают из соответствующих графиков для одномерного поля, приведенных выше. При нахождении критериев подставляют B или L вместо S и y или z вместо x .

Метод тепловой диаграммы

По методу тепловой диаграммы расчет процесса нагрева выполняют следующим образом: назначают температуру поверхности изделия, по которой определяют величины тепловых потоков в начале q_n и в конце q_k интервала. По крайним значениям теплового потока находят среднее значение за интервал нагрева как среднелогарифмическое:

$$q_{ср} = \frac{q_n - q_k}{2,3 \lg \frac{q_n}{q_k}} \text{ Вт/м}^2.$$

По величине теплового потока q_k находят перепад температур ($^{\circ}\text{C}$) по сечению изделия:

$$\Delta t = \frac{q_k S}{2 \lambda}.$$

Приращение энтальпии изделия определяют по средним значениям температур по сечению тела:

$$\Delta i = i_k - i_n = c_0^{t_{ср.к}} t_{ср.к} - c_0^{t_{ср.н}} t_{ср.н} \text{ кДж/кг.}$$

Продолжительность интервала (τ) определяют по формуле

$$\tau = \frac{\Delta i S \rho}{k_1 q_{ср}}.$$

Коэффициент k_1 определяют по табл. XIII-2 в зависимости от формы тела.

Расчет процесса нагрева ведут последовательно в несколько интервалов (не менее трех).

Расчет по методу «тонких» изделий с поправкой на массивность

Расчет нагрева по методу «тонких» изделий с поправкой на массивность аналогичен ведению расчета по методу тепловой диаграммы.

Продолжительность нагрева определяется по формуле

$$\tau = \frac{S \rho c_{cp}}{k_1 \alpha} m \cdot 2,3 \lg \frac{t_n - t_{cp.н}}{t_n - t_{cp.к}} \text{ ч,}$$

где m — коэффициент, учитывающий несовершенство теплопроводности массивных изделий,

$$m = 1 + \frac{(k_3 - 1) \alpha S}{k_3 k_2 \lambda} \text{ для } Bi \neq \infty.$$

Коэффициенты k_1 даны в табл. XIII-2, а значения k_2, k_3 — в табл. XIII-1.

Метод регулярного режима при условии нагрева $t_n = \text{const}$

Нагрев при заданной температуре окружающей среды может производиться по формулам, которые пригодны для пластины при $\frac{\alpha \tau}{S^2} \geq 0,3$ и для цилиндра при $\frac{\alpha \tau}{R^2} \geq 0,25$, когда наступает так называемый регулярный режим.

Таблица XIII-4

Коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения пластины толщиной $2S$

Критерий $Bi, \frac{\alpha}{\lambda} S$	δ^2	P	M	N	Критерий $Bi, \frac{\alpha}{\lambda} S$	δ^2	P	M	N
0,00	0,0000	1,000	1,000	1,000	2,2	1,222	0,535	0,960	1,186
0,01	0,0100	0,997	1,000	1,002	2,4	1,277	0,510	0,956	1,193
0,02	0,0199	0,993	1,000	1,003	2,6	1,332	0,488	0,952	1,200
0,04	0,0397	0,987	1,000	1,006	2,8	1,380	0,468	0,948	1,205
0,06	0,0584	0,981	1,000	1,010	3,0	1,420	0,448	0,944	1,210
0,08	0,0778	0,974	1,000	1,013	3,5	1,52	0,406	0,935	1,221
0,10	0,0968	0,967	1,000	1,016	4,0	1,59	0,370	0,926	1,229
0,12	0,1154	0,960	1,000	1,020	4,5	1,66	0,338	0,919	1,235
0,14	0,1337	0,954	1,000	1,023	5,0	1,73	0,314	0,912	1,240
0,16	0,1518	0,948	1,000	1,026	5,5	1,78	0,293	0,906	1,244
0,18	0,1697	0,942	1,000	1,029	6,0	1,82	0,273	0,901	1,248
0,20	0,1874	0,936	1,000	1,031	7,0	1,90	0,241	0,892	1,254
0,22	0,2048	0,930	1,000	1,034	8,0	1,95	0,216	0,885	1,257
0,24	0,2220	0,924	0,999	1,037	9,0	2,00	0,196	0,879	1,260
0,26	0,2390	0,918	0,999	1,040	10	2,04	0,180	0,874	1,262
0,28	0,2558	0,912	0,999	1,042	12	2,08	0,152	0,866	1,265
0,30	0,2723	0,906	0,999	1,045	14	2,12	0,132	0,859	1,267
0,35	0,3125	0,891	0,998	1,052	16	2,16	0,116	0,855	1,268
0,40	0,3516	0,877	0,998	1,058	18	2,20	0,104	0,851	1,269
0,45	0,3894	0,863	0,997	1,064	20	2,24	0,094	0,847	1,270
0,50	0,4264	0,849	0,996	1,070	25	2,27	0,076	0,841	1,271
0,55	0,4624	0,836	0,995	1,076	30	2,30	0,065	0,836	1,271
0,60	0,497	0,823	0,994	1,081	35	2,33	0,0560	0,832	1,272
0,70	0,564	0,798	0,992	1,092	40	2,35	0,0500	0,829	1,272
0,80	0,626	0,774	0,990	1,102	50	2,37	0,0400	0,826	1,272
0,90	0,684	0,751	0,988	1,111	60	2,39	0,0333	0,824	1,273
1,00	0,740	0,729	0,986	1,119	70	2,40	0,0286	0,822	1,273
1,20	0,841	0,689	0,981	1,134	80	2,41	0,0250	0,820	1,273
1,40	0,931	0,653	0,977	1,148	90	2,41	0,0222	0,819	1,273
1,60	1,016	0,619	0,972	1,159	100	2,42	0,0200	0,818	1,273
1,80	1,090	0,587	0,968	1,169	∞	2,467	0,0000	0,810	1,272
2,00	1,162	0,559	0,964	1,179					

Расчетные формулы для плиты толщиной $2S$:
температура поверхности

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{ц}} - (t_{\text{ц}} - t_{\text{н.ср}}) P \exp\left(-\delta^2 \frac{a \tau}{S^2}\right);$$

температура оси

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{п}} - (t_{\text{п}} - t_{\text{н.ср}}) N \exp\left(-\delta^2 \frac{a \tau}{S^2}\right);$$

средняя температура по сечению

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_{\text{н.ср}}) M \exp\left(-\delta^2 \frac{a \tau}{S^2}\right).$$

Значения δ^2 , P , N и M приведены в табл. XIII-4 в зависимости от критерия $\alpha S/\lambda$. Для цилиндра диаметром $2R$ расчетные формулы имеют аналогичный вид. Вместо S подставляется значение R , вместо $\delta^2 - \mu^2$ и вместо $P, N, M - P_0, N_0, M_0$. Значения этих величин приведены в табл. XIII-5.

Таблица XIII-5

Коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения длинного цилиндра радиуса R

Критерий $\frac{a \tau}{\lambda R}$	μ^2	P_0	M_0	N_0	Критерий $\frac{a \tau}{\lambda R}$	μ^2	P_0	M_0	N_0
0,00	0,0000	1,000	1,000	1,000	2,2	2,70	0,584	0,949	1,357
0,01	0,0200	0,998	1,000	1,002	2,4	2,84	0,558	0,943	1,375
0,02	0,0398	0,995	1,000	1,005	2,6	2,97	0,534	0,937	1,392
0,04	0,0792	0,990	1,000	1,010	2,8	3,09	0,513	0,931	1,406
0,06	0,1183	0,985	1,000	1,014	3,0	3,20	0,492	0,925	1,420
0,08	0,1569	0,980	1,000	1,019	3,5	3,44	0,446	0,910	1,449
0,10	0,1951	0,975	1,000	1,024	4,0	3,64	0,407	0,896	1,472
0,12	0,2329	0,970	1,000	1,029	4,5	3,81	0,374	0,884	1,489
0,14	0,2704	0,965	1,000	1,034	5,0	3,96	0,345	0,873	1,504
0,16	0,3075	0,960	1,000	1,039	5,5	4,09	0,320	0,863	1,516
0,18	0,3443	0,956	1,000	1,044	6,0	4,20	0,229	0,854	1,527
0,20	0,3807	0,951	1,000	1,048	7,0	4,38	0,262	0,837	1,541
0,22	0,4167	0,946	0,999	1,053	8,0	4,53	0,234	0,823	1,551
0,24	0,4524	0,941	0,999	1,057	9,0	4,65	0,210	0,812	1,560
0,26	0,4877	0,937	0,999	1,062	10	4,75	0,191	0,803	1,566
0,28	0,5226	0,932	0,999	1,067	12	4,92	0,161	0,788	1,575
0,30	0,5572	0,927	0,999	1,071	14	5,03	0,137	0,776	1,581
0,35	0,642	0,915	0,998	1,082	16	5,12	0,120	0,768	1,585
0,40	0,726	0,903	0,998	1,093	18	5,18	0,106	0,761	1,588
0,45	0,806	0,891	0,997	1,103	20	5,24	0,095	0,755	1,590
0,50	0,888	0,880	0,996	1,114	25	5,34	0,076	0,744	1,595
0,55	0,962	0,869	0,995	1,124	30	5,41	0,065	0,736	1,598
0,60	1,036	0,858	0,993	1,134	35	5,46	0,0560	0,730	1,600
0,70	1,184	0,836	0,991	1,154	40	5,50	0,0500	0,725	1,602
0,80	1,322	0,815	0,989	1,172	50	5,55	0,0400	0,719	1,603
0,90	1,453	0,795	0,987	1,190	60	5,59	0,0333	0,714	1,604
1,00	1,580	0,774	0,985	1,208	70	5,62	0,0286	0,710	1,604
1,20	1,81	0,738	0,979	1,239	80	5,64	0,0250	0,707	1,605
1,40	2,03	0,704	0,973	1,268	90	5,66	0,0222	0,705	1,605
1,60	2,22	0,671	0,967	1,295	100	5,68	0,0200	0,704	1,606
1,80	2,39	0,639	0,961	1,319	∞	5,787	0,0000	0,691	1,606
2,00	2,55	0,610	0,955	1,340					

При нагреве тел ограниченных размеров температуры получают, перемножив функции для одномерного поля. Формулы для призмы размерами $2S \times 2B$ имеют следующий вид:

температура ребра

$$(x = S; y = B); t_{S, B} = t_n - (t_n - t_{н.сп}) P_S P_B \exp(-\beta a \tau);$$

температура поверхности на середине грани ($x=0; y=B$)

$$t_{0, B} = t_n - (t_n - t_{н.сп}) N_S P_B \exp(-\beta a \tau);$$

температура поверхности на середине грани ($x=S; y=0$)

$$t_{S, 0} = t_n - (t_n - t_{н.сп}) N_B P_S \exp(-\beta a \tau);$$

температура оси ($x=0; y=0$)

$$t_{0, 0} = t_n - (t_n - t_{н.сп}) N_S N_B \exp(-\beta a \tau);$$

средняя температура призмы

$$t_{сп} = t_n - (t_n - t_{н.сп}) M_S M_B \exp(-\beta a \tau);$$

средняя температура грани ($2B$)

$$t_{сп B} = t_n - (t_n - t_{н.сп}) P_S M_B \exp(-\beta a \tau);$$

средняя температура грани ($2S$)

$$t_{сп S} = t_n - (t_n - t_{н.сп}) P_B M_S \exp(-\beta a \tau);$$

Параметр β определяют по формуле

$$\beta = \frac{\delta_S^2}{S^2} + \frac{\delta_B^2}{B^2}.$$

Коэффициенты δ_S^2 , P_S , N_S и M_S определяют по табл. XIII-4 в зависимости от величины $\alpha S/\lambda$. Коэффициенты δ_B^2 , P_B , N_B и M_B находят из той же таблицы, но в зависимости от величины $\alpha B/\lambda$.

Аналогичный вид имеют формулы для параллелепипеда с размерами $2S \times 2B \times 2L$ и цилиндра $2R \times 2H$.

НАГРЕВ ГОРЯЧИХ СЛИТКОВ

Решение дифференциального уравнения теплопроводности для случая нагрева горячих слитков в критериальной форме имеет следующий вид:

для пластины

$$\frac{(t - t_{н.ц}) 2 \lambda}{q_0 S} = f \left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{x}{S}; \frac{q_1}{q_0} \right);$$

для цилиндра

$$\frac{(t - t_{н.ц}) 2 \lambda}{q_0 R} = f \left(\frac{\alpha \tau}{R^2}; \frac{r}{R}; \frac{q_1}{q_0} \right),$$

где q_0 — тепловой поток охлаждения слитка перед его посадкой в печь, Вт/м², определяемый как сумма тепловых потоков излучением и конвекцией;

q_1 — тепловой поток при нагреве слитка в печи.

Графически эти зависимости представлены на рис. 189—192 для пластины и цилиндра для точек поверхности x/S или $r/R=1$ и точек на оси слитка x/S или $r/R=0$.

Приведенные графики справедливы для условий нагрева слитка в печи при $M_0 = \text{const}$, т. е. при постоянной тепловой мощности колодцев,

либо для условий нагрева постоянным тепловым потоком $q = \text{const}$ в области нерегулярного режима. Итак, необходимо, чтобы первый период нагрева был меньше $\tau_1 < \tau'$, т. е. меньше инерционного времени нагрева слитка: $\tau' = R^2/Ka$. Здесь K зависит от формы тела. Для плиты $K=6$,

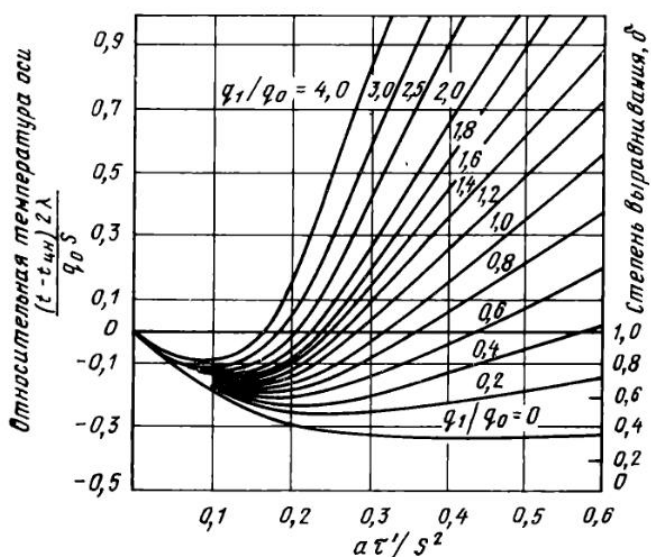


Рис. 189. График для определения температуры середины пластины при нагреве горячего посада

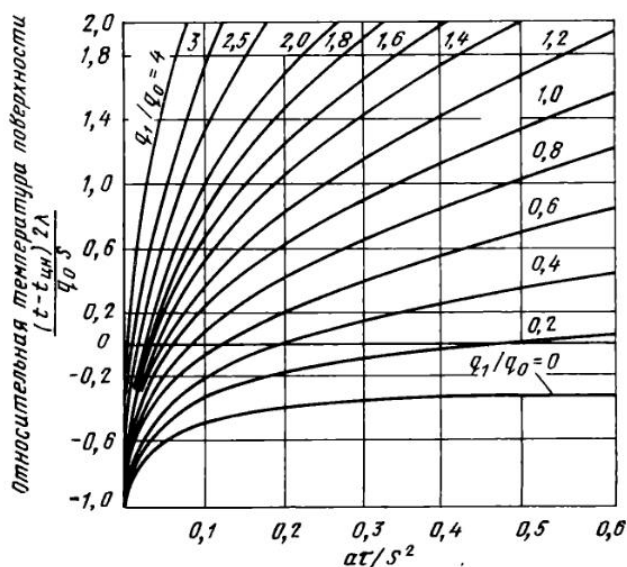


Рис. 190. График для определения температуры поверхности пластины при нагреве горячего посада

для цилиндра $K=8$ и для шара $K=10$. Пригодность использования данной методики может быть также оценена по температуре на оси слитка $t_{\text{пов}1}$ в конце первого периода нагрева при $M_0 = \text{const}$.

Должно быть

$$t_{\text{ц}1} = t_{\text{пов}1} - \frac{q_1 R}{2 \lambda} = t_{\text{пов}1} - \Delta t_1 < t_{\text{ср.н}},$$

т. е. меньше начальной средней температуры слитка.

Рис. 191. График для определения температуры оси цилиндра при нагреве горячего посада

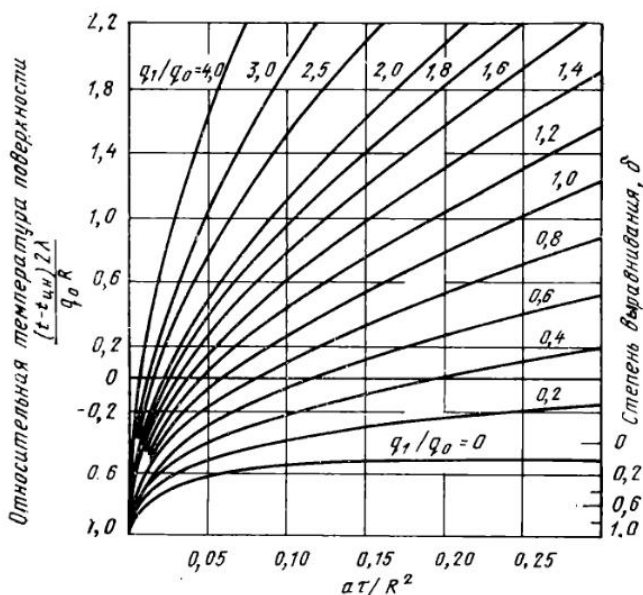
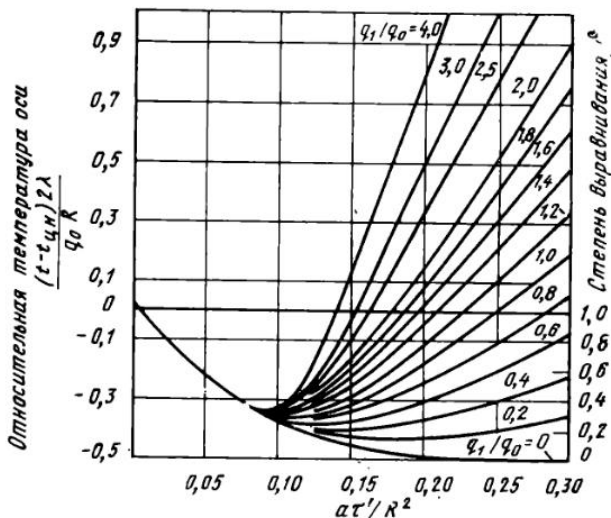


Рис. 192. График для определения температуры поверхности цилиндра при нагреве горячего посада

НАГРЕВ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛОВ

Нагрев неподвижного слоя кусковых материалов при фильтрации через него теплоносителя базируется на решениях Шумана и Анцелиуса, представленных на рис. 193—195. Решения выполнены для условия $t_0 = \text{const}$. Относительная температура слоя материалов $\theta_m = \frac{t_m - t_{\text{нач}}}{t_0 - t_{\text{нач}}}$ или относительная температура газа $\theta_r = \frac{t_r - t_{\text{нач}}}{t_0 - t_{\text{нач}}}$ на графиках представлены в зависимости от критерия высоты $Y = \frac{k_0 h}{c_r w_0}$ и критерия времени $Z = \frac{k_0 \tau}{c_m (1-f)}$. В случае необходимости в критерии включаются переводные множители 3600 и 1000.

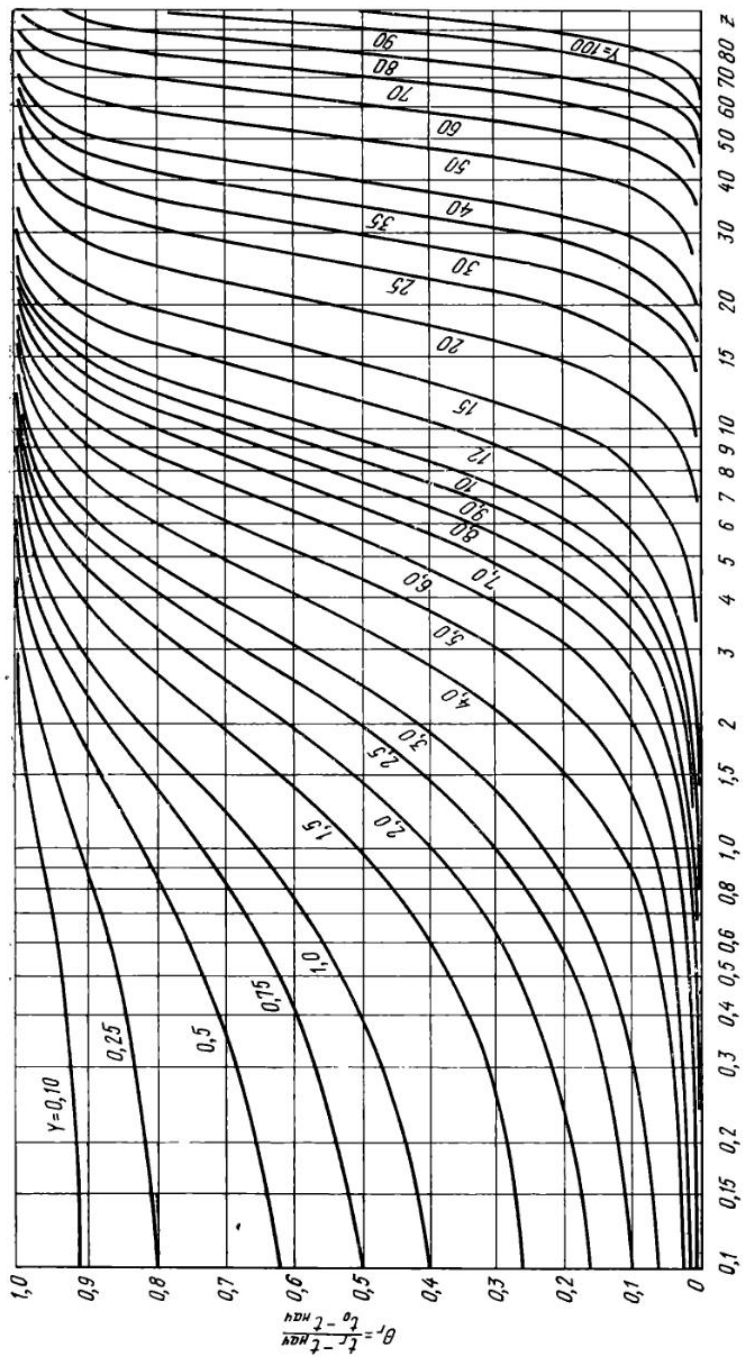


Рис. 193. График для определения температур газа в неподвижном слое

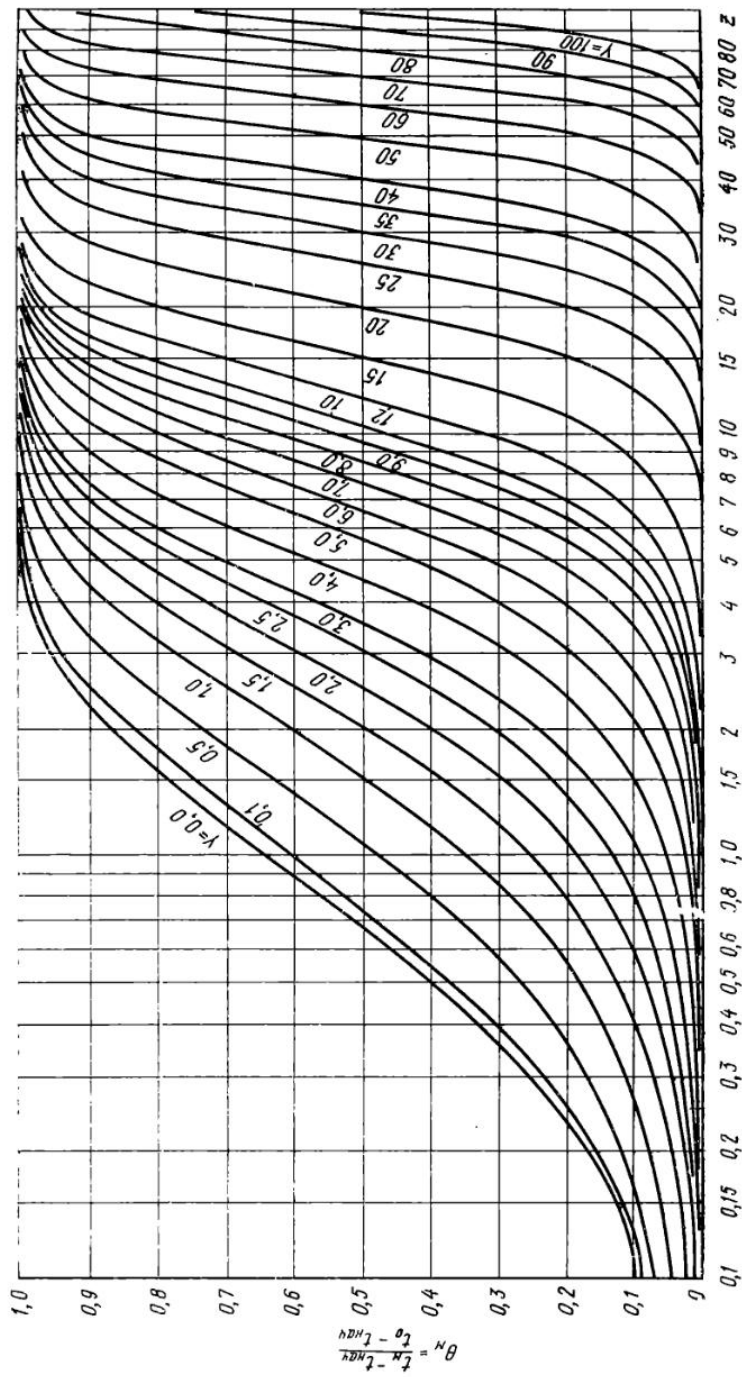


Рис. 194. График для определения температур материала в неподвижном слое

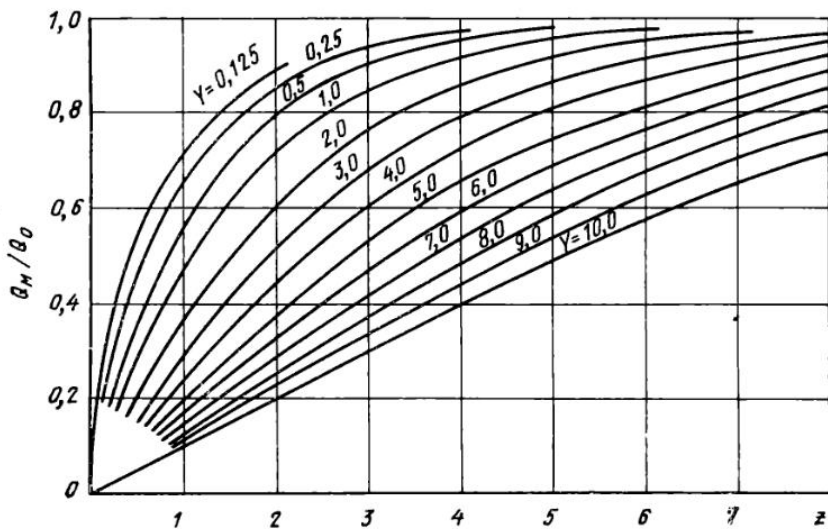


Рис. 195. График для определения относительной энтальпии материала слоя Q_M/Q_0 .

Здесь t_m — температура массы материала слоя после тепловой обработки его газом, °С;

t_0 — температура газов на входе в слой (температура материала), °С;

t_r — температура газов на выходе из слоя (температура материала), °С;

$t_{нач}$ — начальная температура материалов, °С;

h — высота слоя, м;

c_r — теплоемкость газа, кДж/(м³·°С); Дж/(м³·°С);

w_0 — скорость прохождения газового потока, отнесенная к свободному сечению шахты, м/с;

f — порозность слоя; для доменных шихт и известняка $f \approx 0,5$;

τ — время, ч (при необходимости использовать множитель 3600);

c_m — объемная (кажущаяся) теплоемкость материала слоя с учетом тепла на сушку, обжиг и пр.; кДж/(м³·°С); Дж/(м³·°С);

d — диаметр куска, м;

λ — коэффициент теплопроводности куска, Вт/(м·°С);

α_v — объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³·°С); кВт/(м³·°С);

k_v — суммарный объемный коэффициент теплопередачи, учитывающий внутреннее тепловое сопротивление куска

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{\alpha_v} + \frac{d^2}{72(1-f)\lambda} \quad (\text{м}^3 \cdot \text{°С})/\text{Вт}.$$

Для действующих доменных печей

$$\alpha_v = 186 \frac{w^{0,9}}{d^{0,75}} T^{0,3} M';$$

для калиброванной шихты $M' = 1$; при 20% мелочи $M' = 0,5$;

для рядовой шихты и засыпки конусным аппаратом $M' = 0,3$.

Для слоя из шаров $d=1,6 \div 6,35$ мм при идеальном распределении газового потока

$$\alpha_v = 131 \frac{w}{d} T^{0,3}.$$

Для теплоотдачи между газом и пористой массой «пирога» агломерата

$$\alpha = 8,7 \cdot 10^4 w^{0,77}.$$

Для мелких натуральных засыпок (угольная мелочь, зерно и др.)

$$Nu = 0,23 Re^{0,863}.$$

Для получения изменения во времени температуры газа в месте его выхода из слоя задают значения τ и определяют значения критерия времени Z . С помощью этих данных и критерия высоты Y по рис. 193 определяют значения симплекса θ_r и t_r .

При необходимости нахождения значения температур материала во времени задают величину Z и, меняя критерий Y , определяют распределение температур по высоте слоя в рассматриваемый момент времени, используя график, представленный на рис. 194.

Количество тепла, аккумулированное слоем материала Q_m от начала его прогрева (отданное им при охлаждении), определяют по рис. 195 в зависимости от критериев Y и Z . Эти данные представлены в виде отношения Q_m/Q_0 . Здесь $Q_0 = P_m C_m t_0$ — максимальная энтальпия материала слоя. Величина $Q_m = hF(1-f) C_m t_m$ позволяет также определить температуру материала t_m .

НАГРЕВ ЗАГотовок НА МОНОЛИТНОМ ПОДУ МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

В методических печах при переходе нагреваемого металла с глиссажных труб на монолитный под происходит изменение краевых условий нагрева.

На монолитном поду сварочной зоны начальные условия

$$t = t_{\text{пов}} - \Delta t \left[2 \frac{x}{S} - \left(\frac{x}{S} \right)^2 \right]$$

и поверхностные условия

$$\frac{\partial t}{\partial x_{x=2S}} = h (t_n - t).$$

Решение дифференциального уравнения в этом случае имеет вид

$$\frac{t - t_n}{t_n - t_n} = f \left(\frac{a \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda} \right).$$

Графически это решение представлено на рис. 196, по которому можно определить температуру верхней и нижней поверхности металла при переходе на монолитный под по известному времени нагрева металла на монолитном поду сварочной зоны.

При нагреве металла в томительной зоне многозонных методических печей возможны два варианта:

1) нагрев при поверхностных условиях для $x=2S$, $t_{\text{пов}} = \text{const}$ и начальных условиях

$$t = t_n - \Delta t \left[2 \frac{x}{S} - \left(\frac{x}{S} \right)^2 \right].$$

Для этого случая решение в виде

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{н}}} = \delta = f\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}\right)$$

графически представлено на рис. 166 для $x=2S$;

2) нагрев в томильной зоне методической печи при $t_{\text{п}} = \text{const}$ может быть рассчитан по уравнению

$$\frac{t_{\text{п.т}} - t_{\text{пов.к}}}{t_{\text{п.т}} - t_{\text{пов.н}}} = \Phi_1 + \Phi_2 \frac{t_{\text{п.с}} - t_{\text{пов.к}}}{t_{\text{п.т}} - t_{\text{пов.к}}},$$

где $t_{\text{п.с}}$ — температура печи в сварочной зоне;
 $t_{\text{пов.н}}$ и $t_{\text{пов.к}}$ — температуры поверхности металла в начале и конце томильной зоны.

Функции Φ_1 и Φ_2 представлены на рис. 197.

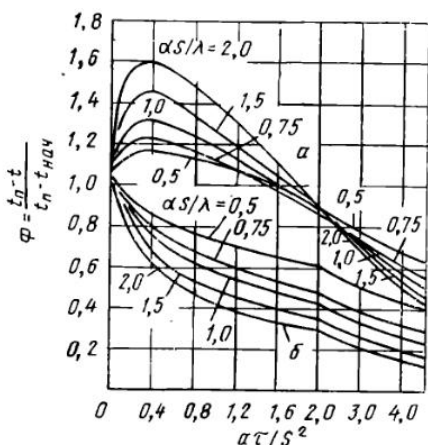


Рис. 196. График для расчета нагрева металла на монолитном поду сварочной зоны методических печей:
 а — нижняя поверхность; б — верхняя поверхность

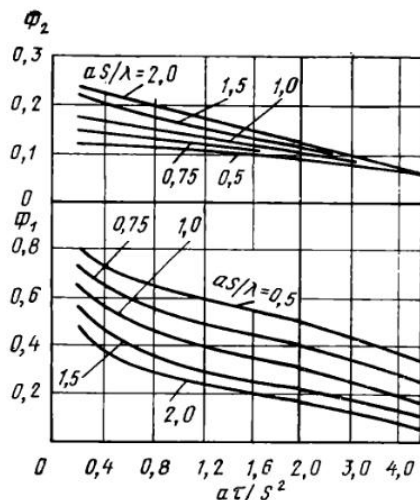


Рис. 197. Выдержка металла на монолитном поду томильной зоны методических печей при $t_{\text{п}} = \text{const}$

ТЕХНОЛОГИЯ НАГРЕВА СТАЛИ

При выполнении теплотехнических расчетов динамики нагрева изделий необходимо знать конечное распределение температур в теле, которое характеризуют конечной температурой поверхности $t_{\text{п.к}}$ и конечной разностью температур между наиболее высокой и наиболее низкой температурами в теле:

$$\Delta t_{\text{к}} = t_{\text{пов.к}} - t_{\text{ц.к.}}$$

Конечная температура нагрева изделия выбирается в зависимости от технологических условий и дальнейших технологических процессов, для совершения или выполнения которых производится процесс нагрева.

При плавлении изделий конечная температура выбирается выше температуры ликвидуса для сплавов или точки плавления для чистых металлов. Величина перегрева зависит от конкретных условий; так, например, для различных марок сталей она составляет $100 \div 200^\circ\text{C}$.

Конечная температура стали при нагреве под прокатку выбирается на $100 \text{—} 150^\circ\text{C}$ ниже температуры солидуса, вблизи которой

происходят явления пережога. Теоретическая температура пережога и максимальная температура нагрева приведены в табл. XIII-6 для некоторых марок сталей.

Таблица XIII-6

Теоретическая температура пережога и максимальная температура нагрева

Сталь	Максимальная температура нагрева, °C	Температура пережога, °C	Сталь	Максимальная температура нагрева, °C	Температура пережога, °C
Углеродистая, содержащая С, %:			Кремнемарганцевая пружинная	1250	1350
1,5	1050	1140	Хромованадиевая	1250	1350
1,1	1080	1180	Быстрорежущая	1280	1380
0,9	1120	1220	Аустенитная хромоникелевая	1300	1420
0,7	1180	1280			
0,5	1250	1350			
0,2	1320	1470			
0,1	1350	1490			

Эти величины могут быть также определены по рис. 198 или по диаграмме Fe—Fe₃C (см. рис. 16, а также табл. XIII-7).

Таблица XIII-7

Температура нагрева углеродистых и легированных сталей (по заводским данным)

Группа	Стали	Температура нагрева слитков, °C
I	10—30 Т	1200—1220
II	40—55, 41А—50А, СК, 15Г—65Г, 65ГП, 48—БВ, С45, 15Х—33Х, 30Г2—50Г2, 15ХФ, 20ХФ	1180—1200
	35Х—45Х, 38ХА, 30ХМА, 50ХГ, 50ХГА, 50ХГС	
III	ШХ6—15, 0Х6—15, ЭИ325, У5—У9, У7А—У9А, Х, 9Х, Х09, 7Х3, 8Х3, 4ХС, 9ХС, В1, В2, 7Х, 4ХВС—6ХВС, ХВГ, 5ХВГ, 9ХВГ, 8СВМ, Ф, 8ХФ, 50ХФ, ЕХ2, ЕХ3, ЭИ241	1150—1170
IV	У10—У13, У10А—У13А, Х12, Х12М, Х12К, ХГ, У12Г, ХВ5, Х05	1100—1120
V	55С2, 60С2, 60С2А, 70С3А, 58СН2А, ЭИ142, ЭИ239	1180—1200
VI	13Н2А, 12ХН2А, 12ХН3А, 13ХН4А	1180—1200
	20ХН3А, 20ХН—45ХН, 12Х2Н4А, Э8, 30ХН3	
VII	33ХСМА, 18ХГМ, 33ХСА, 38ХСА, 35ХГСА, 40СХ, 25Н3, 37ХН3А, 38ХН3А, Э12, 25ХН4, 40ХНМА, 45ХНМФА, Х3НМ1—3, 45ХМФА, ЭИ274, ЭИ275, ЭИ320, 12Х2Н3МА	1180—1200

Группа	Стали	Температура нагрева слитков, °С
VIII	13ХНВА, Э14, 18ХНВА, 4ХНМ, 5ХНМ, 6ХНМ, 5ХГМ, ХНМ, 5315, 12Х5МА, ЭИ14, СХВ, ЭИ107, 38ХМЮА	1180—1200
IX	Н42, ЭИ318, ЭИ341, ЭИ292, ЭИ340, ЭИ181, ЭИ60, фуродит	1200—1220
X	ЭИ160, ЭИ161, Ж1—4, 18Х14А, 18Х15А, Я2, ЯИТ, Я1Т, 3ХВ8	1170—1190
XI	Г, Ст0—4	1240—1260
XII	1085, У5—У9, У7А—У9А	1120—1150

На основании своих экспериментов Е. И. Казанцев рекомендует формулу для определения температуры перегрева доэвтектоидных углеродистых сталей: $t_{пер} = 1320 + 8,35 [C] + 250 [C]^2$ °С, где [С] — содержание углерода в стали, %.

Эта температура может выбираться в качестве предельной при назначении температуры нагрева металла перед обработкой давлением.

При выборе конечной температуры нагрева необходимо иметь в виду, что температура не одинакова по всей поверхности и особенно велика при нагреве на ребрах и углах изделия. В зависимости от температуры источника тепла и его расположения по отношению к изделию эта разность температур может достигать 100÷200°С и более. Температуры начала и конца прокатки приведены для легированных сталей в табл. XIII-8 иковки различных сталей — в табл. XIII-9.

Таблица XIII-8
Температура прокатки

Стали	Температура, прокатки, °С				
	слитков		заготовок		
	начало	конец не ниже	начало	конец	
				не выше	не ниже
Высококачественная нелегированная инструментальная	1100—1050	750	1050—1000	850	750
Качественная нелегированная инструментальная	1100—1050	750	1050—1000	850	750
Легированная инструментальная:					
типа ХГ, Х, 9Х, 9ХС, В1, В2, ХВГ, Ф	1100—1050	850	1050—1000	850	750
типа 4ХС, 7Х, 7ХЗ, 5ХВС, 4ХНВ, 5ХНМ	1150—1100	850	1130—1080	850	750
типа Х12, Х12М, ХВ5	1050—1000	800	1020—980	—	750
Быстрорежущая и хромовольфрамовая 3ХВ8	1200—1150	900	1180—1130	—	900
Шариковая и шарикоподшипниковая	1150—1100	850	1080—1030	850	750
Магнитная	1180—1150	850	1160—1100	850	750
Пружинная для рессор	1130—1080	900	1100—1050	—	850
Динамная и трансформаторная	1250—1200	1000	1220—1180	—	750
Нержавеющая мартенситная	1180—1130	900	1180—1130	—	900
Нержавеющая аустенитная	1180—1130	900	1180—1130	—	900
Жароупорная и силхромовая	1200—1160	900	1180—1140	—	850
Марганцовистая (12% Mn)	1120—1070	950	1100	—	900
Сталь с особыми физическими свойствами	1120—1080	900	1100—1060	—	850
Нихромовая	1100—1050	950	1100—1050	—	950

Температура начала и концаковки различных сортов стали

Стали	Температура ковки, °С	
	начало	конец
Углеродистые, содержание С, %:		
0,1—0,15	1200	800
0,2—0,59	1150	800
0,6	1100	800
0,7	1100	800
0,8—1,2	1050	800
Никелевые, содержащие, %:		
0,15—0,2 С, 1,0 Ni	1250	950
0,25—0,3 С, 3,0 Ni	1100	950
0,25—0,3 С, 5,0 Ni	1100	950
0,25—0,3 С, 25,0 Ni	1100	1000
Хромоникелевые (0,2—0,3% С, 3% Ni, 1,0% Cr)	1100	850
Хромистые с содержанием хрома, %:		
0,6—0,9	1150	800
1,6—2,1	1100	850
Кремнемарганцевая (1,5—1,8% Si, 0,7—0,9% Mn)	1100	850
Хромомолибденовая (0,9—1,2% Cr, 0,3—0,5% Mn)	1150	850

При термической обработке конечные температуры нагрева выбирают в зависимости от вида термообработки по диаграмме Fe—Fe₃C, либо по таблицам, таким образом, чтобы температура на поверхности изделия была на 30—50°С выше температуры соответствующей критической точки.

Разность температур по сечению тела должна быть с точки зрения технологии как можно меньше, однако такое требование снижает производительность нагревательных устройств (рис. 198, 199).

Конечная неравномерность нагрева стали перед прокаткой выбирается 1—3°С на 1 см толщины изделия. Чем больше толщина изделия, тем меньшую величину принимают для расчета. Желательно, чтобы на оси металла была температура, равная температуре начала прокатки.

Для термообработки Δt_k принимают равным 20—30°С с таким расчетом, чтобы обеспечить структурные превращения по всему сечению изделия.

Температурные напряжения при нагреве

При нагреве металла возникают температурные напряжения, которые необходимо учитывать для сталей с низким коэффициентом теплопроводности. При температурах выше 500°С температурные напряжения не представляют опасности, поскольку они приводят к пластическим деформациям. Величина температурных напряжений зависит от формы изделия, его размеров и возникающего внутри изделия перепада температур. В свою очередь перепад температур определяется тепловым сопротивлением изделия и тепловым потоком, который зависит от температуры печи (для холодного всада). Значения допустимой температуры печи $t_{п, доп}$ приведены на рис. 200 и 201. Возникающий внутри изделия перепад температур Δt рассчитывается либо ориентировочно может быть определен по рис. 202. Распределение возникающих внутри изделия тем-

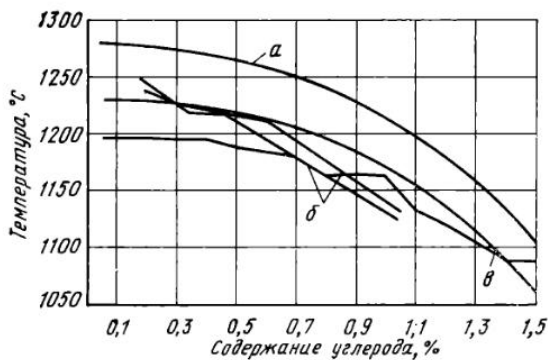


Рис. 198. Влияние содержания углерода на температуру нагрева углеродистых и легированных сталей: а — по данным американских заводов; б — по данным трубных заводов; в — по данным Златоустовского завода

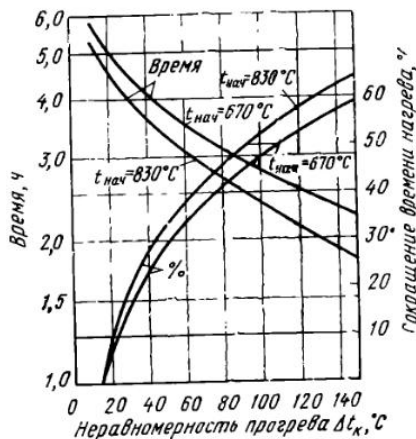


Рис. 199. Изменение продолжительности нагрева горячих слитков в зависимости от разности температур по их сечению в конце нагрева

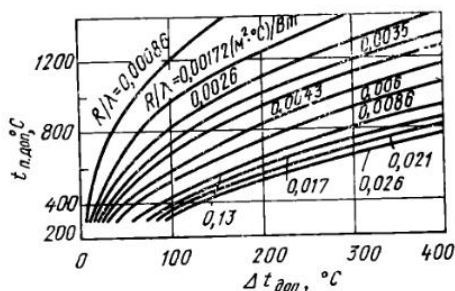


Рис. 200. Допустимая температура печи $t_{п.доп}$ для пластины в зависимости от максимально допустимой разности температур поверхности и середины металла $\Delta t_{доп}$

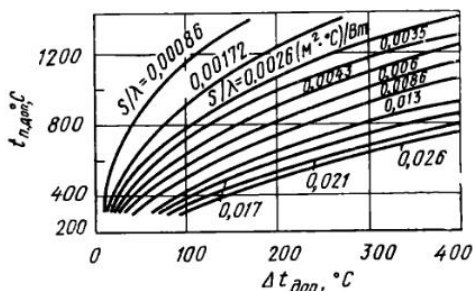


Рис. 201. Допустимая температура печи $t_{п.доп}$ для цилиндра в зависимости от максимально допустимой разности $\Delta t_{доп}$ температур поверхности и середины металла

температурных напряжений и их величина могут быть определены по формулам:

для пластины

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{q S}{2 \lambda} \left(\frac{1}{3} - \frac{x^2}{S^2} \right); \quad \sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{C_n S^2}{2 a} \left(\frac{1}{3} - \frac{x^2}{S^2} \right);$$

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \Delta t \left(\frac{1}{3} - \frac{x^2}{S^2} \right); \quad \Delta t_{доп} = \frac{1,05 \sigma_{доп}}{\beta E}; \quad C_n^{доп} = \frac{2,1 a \sigma_{доп}}{\beta E S^2};$$

для цилиндра

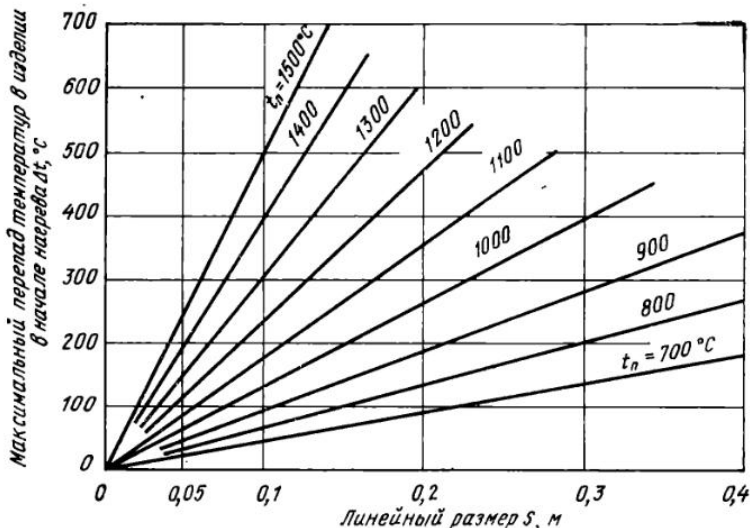
$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{q R}{2 \lambda} \left(\frac{1}{2} - \frac{r^2}{R^2} \right);$$

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{C_n R^2}{4 a} \left(\frac{1}{2} - \frac{r^2}{R^2} \right);$$

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \Delta t \left(\frac{1}{2} - \frac{r^2}{R^2} \right);$$

$$\Delta t_{доп} = \frac{1,4 \sigma_{доп}}{\beta E}; \quad C_n^{доп} = \frac{5,6 \sigma_{доп} a}{\beta E R^2}.$$

Рис. 202. Максимальный перепад температур внутри изделия Δt , устанавливающийся в начале нагрева при температуре печи $t_n = \text{const}$ принято $\lambda = 40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$; $C = 4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°К}^4)$



Окисление стали при нагреве

Различают два вида окалины: так называемую печную и воздушную, т. е. окалину, образовавшуюся при нагреве стали в атмосфере печи или во время пребывания металла с высокой температурой в воздушной среде. Такое разделение окалины связано с условиями ее возникновения, определяющими протекание физико-химических процессов окалинообразования. Эти различия определяют и отличие состава и свойств окалины.

«Воздушная» (атмосферная) окалина имеет поверхностный слой, состоящий из гематита (Fe_2O_3), толщиной 5—10%, и нижний слой, состоящий из магнетита (Fe_3O_4), относительная толщина которого составляет 90—95%.

«Воздушная» окалина почти не имеет пор, она плотно прилегает к поверхности металла и хорошо инкрустируется в его поверхность в процессе обработки давлением. В такой окалине содержится ~72% железа.

Толщина окалины, образовавшейся на воздухе на поверхности среднеуглеродистой стали обыкновенного качества, может быть определена по формуле

$$S_a = 0,34 \exp\left(-\frac{1620}{T}\right) + 0,67 \exp\left(-\frac{3150}{T}\right) \lg \tau,$$

где S_a — толщина слоя «воздушной» окалины, мм;
 T — абсолютная температура поверхности, К;
 τ — время окисления в секундах, с.

Приведенное уравнение описывает результаты проведенных нами экспериментов в диапазоне температур 900—1300°C и охватывает отрезок времени 6—600 с.

Количество образовавшейся окалины Π можно определить по формуле

$$\Pi_a = 0,1 S_a \rho_a \text{ г/см}^2.$$

Здесь Π_a — количество продукта, образовавшегося при окислении металла в воздушной атмосфере, г/см²;

S_a — толщина слоя «воздушной» окалины, мм;

ρ_a — плотность окалины, г/см³. Для «воздушной» окалины на стали можно принять $\rho_a = 6 \text{ г/см}^3$.

Угар металла Y_a , т. е. количество металла, перешедшего в окалину при его пребывании в воздушной среде при высокой температуре, найдем по следующему выражению

$$Y'_a = P_a [\text{Fe}]_a = 0,1 S_a \rho_a [\text{Fe}]_a \approx 0,43 S_a \text{ г/см}^2,$$

или

$$Y_a = 4,3 S_a \text{ кг/м}^2,$$

где Y_a — угар металла, г/см² или кг/м²;

$[\text{Fe}]_a$ — доля железа в «воздушной» окалине, $[\text{Fe}]_a = 0,72$.

«Печная» окалина в наиболее общем случае содержит все три окисла железа: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и FeO . Окислы располагаются последовательно один за другим, более богатые по кислороду — ближе к газовой атмосфере в таком порядке: гематит (Fe_2O_3), магнетит (Fe_3O_4), вюстит (FeO).

В окалине, образовавшейся при нагреве стали в печной атмосфере в течение нескольких часов, соотношение слоев примерно таково: 1 : 3 : : 100. Составленная нами схема разреза окалины представлена на рис. 203.

«Печная» окалина содержит 90—98% вюстита, имеет в среднем ~34% пор, она слабо сцеплена с поверхностью металла, в ней массовое содержание железа достигает 77,5%.

Для определения толщины «печной» окалины автором совместно с Ф. Лораном была предложена формула для определения толщины окалины на слитках после их пребывания в нагревательных колодцах. Она может быть распространена и на металлургические печи других конструкций:

$$S^2 = S_p^2 + k_n^2 (\tau_n - \beta_n n) + k_r^2 \left(\frac{T_r}{2C} \tau_n + \tau_r \right) + k_v^2 \beta_v m,$$

где S — толщина окалины, мм (индексы «р» здесь относятся к раздействию, «п» — посадке, «н» — нагреву, «т» — томлению и «в» — выдаче слитков); толщина окалины S_p на слитке перед посадкой в колодец равна ~0,2 мм;

k — постоянная окалинообразования, мм/ч^{0,5};

τ — время, ч;

T — температура, К;

n — номер посадки слитка;

m — номер выдачи слитка;

β_n — время загрузки одного слитка, ч;

β_v — время выдачи одного слитка, ч; время загрузки и время выдачи одного слитка обычно составляют величину $\beta_n = \beta_v \approx 0,02$ —0,03 ч;

C — постоянная, равная 10 125.

Формула получена при допущении, что процесс окалинообразования идет по параболическому закону

$$S \cdot dS = \frac{1}{2} k^2 d\tau.$$

Величина постоянной окалинообразования для чистого железа и мягких сталей может быть определена по рис. 204 (кривая а).

В области высоких температур можно пользоваться также уравнением

$$k = \exp (-10125/T + 7,25),$$

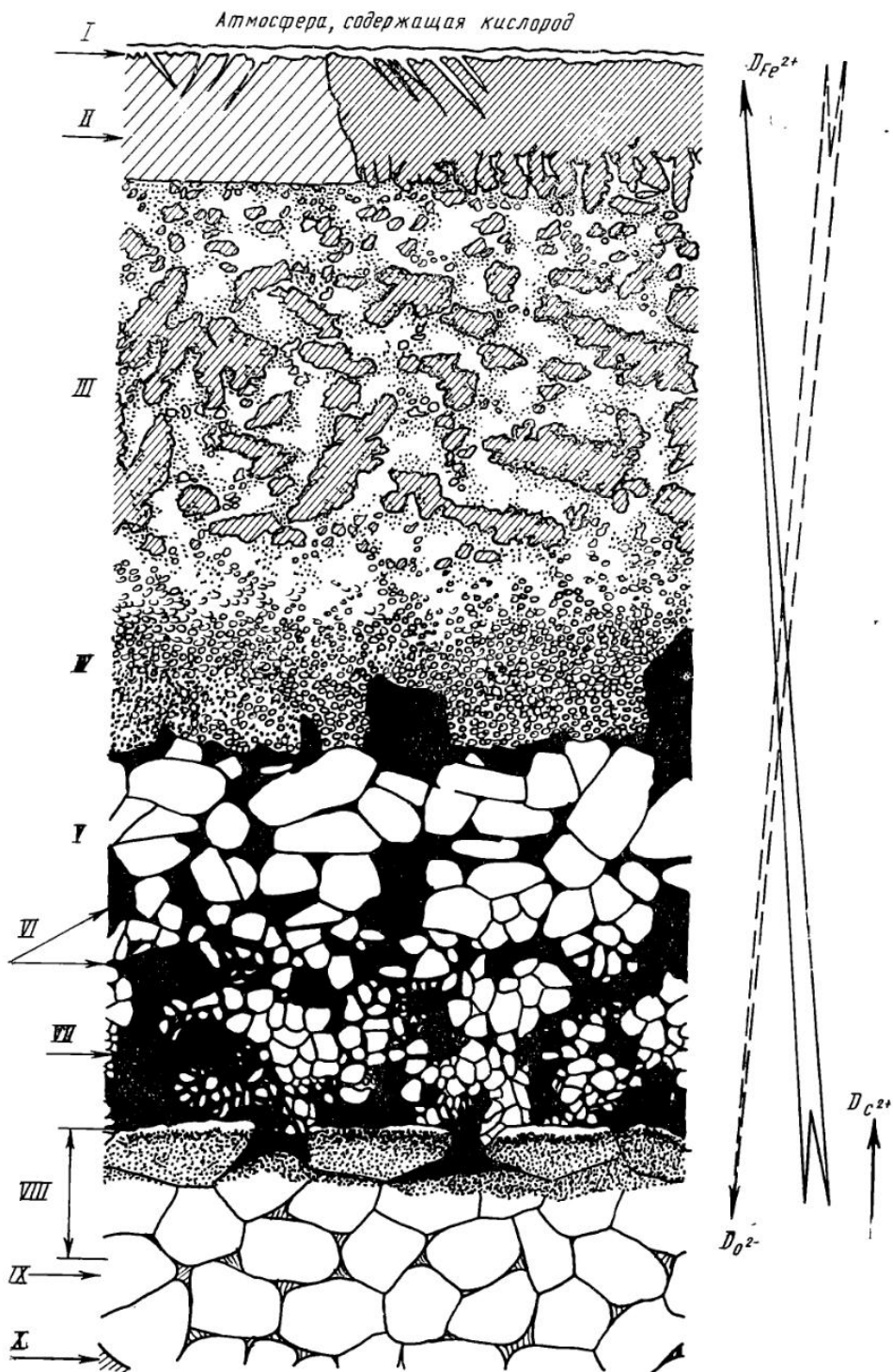


Рис. 203. Схема разреза окалины на стали (пропорциональность толщин различных фаз не соблюдается):

I — гематит Fe_2O_3 ; *II* — кристаллы магнетита Fe_3O_4 ; *III* — вюстит FeO и избыточный O_2 . В холодном состоянии смесь $Fe + Fe_2O_3$; *IV* — реакционная зона $Fe^{2+} + O^{2-} \rightleftharpoons FeO$; *V* — вюстит; насыщенный железом. Первоначальная граница металла; *VI* — поры; *VII* — окислы примесей и легирующих сталей; *VIII* — зона обезуглероживания; *IX* — феррит; *X* — перлит

которое, однако, не всегда удачно аппроксимирует экспериментальные данные (рис. 203, кривая *в*). Необходимо также иметь в виду, что на величину постоянной окалинообразования k весьма сильно влияют легирующие элементы, а также примеси в стали. Наличие даже небольших количеств других элементов в железе может приводить к уменьшению k в несколько раз.

Формула для определения толщины окалины может быть применена при использовании любых видов топлива, сжигаемого с обычным значением коэффициента расхода воздуха больше единицы. Этой формулой

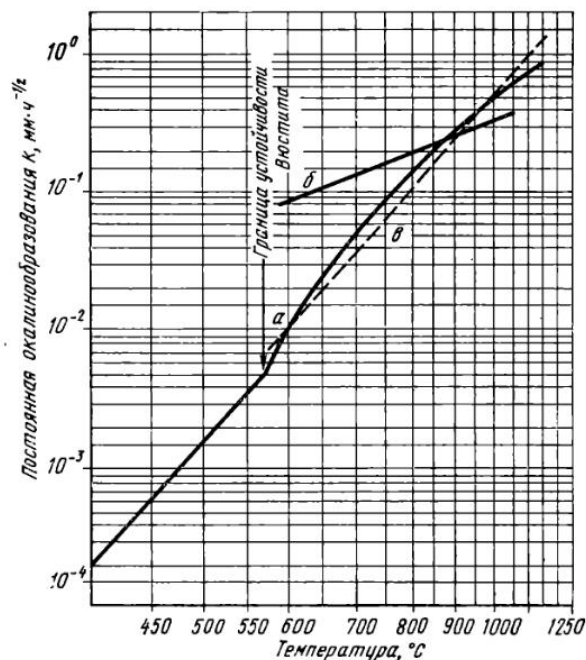


Рис. 204. Значения постоянной окалинообразования в зависимости от температуры:
а — в воздухе; *б* — в среде водяного пара; *в* — по уравнению для k

нельзя пользоваться в тех случаях, если температура поверхности металла превышает температуру плавления окалины (1370°C), когда температура осада выше 1100°C и в тех случаях, когда факел пламени ударяет о поверхность нагреваемого изделия.

Формула выведена для условия нагрева металла с постоянной скоростью изменения температуры поверхности, однако это допущение не вносит существенной ошибки в результаты расчета при рассмотрении практических случаев нагрева слитков в колодцах.

Зная величину толщины окалины S мм, образующейся на поверхности металла, можно рассчитать угар металла $У$ на единицу площади по формуле

$$У = 3,16 S \text{ кг/м}^2.$$

Если известны размеры нагреваемого изделия, то можно пересчитать угар металла на 1 т нагреваемых изделий делением на величину материальной нагрузки G/F (масса/поверхность нагрева).

В обжимных цехах металлургических заводов потери металла от окисления составляют величину 0,6—1,8% от веса (массы посаженных слитков).

Характеристики окислов железа

Окисел	Молекулярная масса	Плотность, кг/м ³	Пределы изменения состава окисла (для O ₂), %	Концентрация кислорода в окисле гO ₂ /см ³ окисла	Стандартное значение энтальпии ΔH_{298} , Дж/моль	Тепловой эффект реакции образования окисла с кислородом, кДж			Температура плавления, °С
						на 1 кмоль Fe	на 1 кг Fe	на 1 кг окисла	
Fe ₂ O ₃ (гематит)	160	5700	30,04—30,06	1,74	—822706	411337	7345,3	5143,9	1583
Fe ₃ O ₄ (магнетит)	232	5900	27,64—28,36	1,63	—1117876	745113	6652,8	4817,4	1597
FeO (вюстит)	72	6250	23,16—25,60	1,39	—266699	800100	4762,5	3703,3	1370

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аладьев И. Т. — «Известия АН СССР. ОТН», 1951, № 11, с. 39—48.
 Арманд А. А. — «Известия ВТИ», 1940, № 8, с. 128—134.
 Арсеев А. В. Сжигание природного газа. М., Metallurgizdat, 1963. 276 с. с ил.
 Артюхов И. М., Шорин С. Н. Газоснабжение. М., изд. МКХ РСФСР, 1956. 326 с. с ил.
 Баскаков А. П. Скоростной безокислительный нагрев и термическая обработка в кипящем слое. М., «Металлургия», 1968. 223 с. с ил.
 Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М., Госэнергоиздат, 1962. 331 с. с ил.
 Боксерман Ю. И. Развитие газовой промышленности СССР. М., Гостехтехиздат, 1958. 130 с. с ил.
 Боришанский В. М. — В кн.: Вопросы аэродинамики и теплообмена в котельно-топочных процессах. М., Госэнергоиздат, 1958, с. 73—85 с ил.
 Браун К. Печи заводов черной металлургии. М., Metallurgizdat, 1961. 306 с. с ил.
 Брицке Э. В. Термические константы неорганических веществ. Изд-во АН СССР. 1949, 1010 с. с ил.
 Бударин Д. В., Красовский Б. А. — «Нагрев и охлаждение тел различной формы». М., Metallurgizdat, 1941 (Труды Уральского политехнического института. Вып. XVIII.), с. 30—35.
 Варгафтик Н. Б., Олещук О. Н. — «Теплоэнергетика», 1955, № 4, с. 19—30.
 Варгафтик Н. Б., Неймарк Б. Е., Олещук О. Н. — «Изв. ВТИ», 1952, № 9, с. 1—7.
 Вейник А. И. Теплообмен между слитком и изложницей. М., Metallurgizdat, 1959. 357 с. с ил.
 Гельд П. В., Купровский Б. Б., Серебренников И. Н. — «Теплоэнергетика», 1956, № 6, с. 45—51.
 Георгиевский З. В. — «Журнал русского физико-химического общества». Т. XXXV, 1903.
 Глинков М. А. Основы общей теории тепловой работы печей. М., Metallurgizdat, 1959. 416 с. с ил.
 Глинков М. А. Методы расчета промышленных печей. М., ОНТИ, 1938. 348 с. с ил.
 Гольдфарб Э. М. — ЖТФ, т. XXIV, 1954, вып. 5, с. 899—906.
 Гольдфарб Э. М. Теплотехника металлургических процессов. М., «Металлургия», 1967. 439 с. с ил.
 Горение и газификация топлива. М., Изд-во АН СССР, 1959 (Труды ИГИ АН СССР. Т. XI), с. 73—89. Авт.: Н. В. Лавров, В. И. Филиппова и др.
 Гребер Г. Введение в теорию теплопередачи. М., Гостехиздат, 1929. 192 с. с ил.
 Гребер Г., Эрк С. Основы учения о теплообмене. М., ОНТИ, 1936. 327 с. с ил.
 Грушев М. В. Газовые нагревательные печи. М., Mashgiz, 1951. 176 с. с ил.
 Грушев М. В. Основы расчета промышленных печей. Киев, Гостехиздат УССР, 1954. 199 с. с ил.
 Гусовский В. Л., Оркин Л. Г., Тымчак В. М. Методические печи. Под ред. В. М. Тымчака. М., «Металлургия», 1970. 430 с. с ил.

- Диомидовский Д. А. *Металлургические печи*. М., *Металлургиздат*, 1961. 728 с. с ил.
- Еринов А. Е., Сорока Б. С. *Рациональные методы сжигания газового топлива в нагревательных печах*. Киев, «Техніка», 1970. 252 с. с ил.
- Зеньковский А. Г. *Методическое пособие по курсовому проектированию*. Под ред. А. И. Ващенко. М., изд. МВМИ, 1966. 136 с. с ил.
- Зижеев Т. А. *Справочник по качеству ископаемых углей и горючих сланцев Советского Союза*. М., *Углетехиздат*, 1957. 144 с. с ил.
- Иванцов Г. П. *Нагрев металла*. М., *Металлургиздат*, 1948. 191 с. с ил.
- Идельчик И. Е. *Справочник по гидравлическому сопротивлению фасонных и прямых частей трубопроводов*. М., ЦАГИ, 1950. 610 с. с ил.
- Идельчик И. Е. *Гидравлические сопротивления*. М., *Госэнергоиздат*, 1954. 316 с. с ил.
- Инструкция по футеровке доменных печей и их вспомогательных устройств*. М., *Металлургиздат*, 1956. 270 с.
- Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. *Теплопередача*. М., «Энергия», 1969. 439 с. с ил.
- Искрасов К. Д. *Жароупорный бетон*. М., *Госстройиздат*, 1957. 224 с. с ил.
- Казанцев Е. И., Гончаров Н. В. — «*Сталь*», 1971, № 8, с. 760—762.
- Казанцев Е. И., Семикин И. Д. — «*Труды металлургического факультета Донецкого политехнического института*». М., *Металлургиздат*, 1955. с. 38—39 с ил.
- Казанцев Е. И. — «*Сталь*», 1957, № 4, с. 358—361 с ил.
- Капустин Е. А., Глинков Г. М. *Движение газов в мартеновских печах*. М., *Металлургиздат*, 1963. 272 с. с ил.
- Карабин А. И. *Сжигание жидкого топлива в промышленных установках*. М., *Металлургиздат*, 1957. 221 с. с ил.
- Карпов А. К. — «*Газовая промышленность*», 1957, № 7, с. 9—14, № 10, с. 1—7 с ил.
- Касенков М. А. *Работа и обслуживание кузнечных печей*. М., *Машгиз*, 1950. 221 с. с ил.
- Китаев Б. И. *Теплообмен в шахтных печах*. М., *Металлургиздат*, 1945. 48 с. с ил.
- Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. Л. *Теплообмен в доменной печи*. М., «*Металлургия*», 1966. 535 с. с ил.
- Ключников А. Д., Иванцов Г. П. *Теплопередача излучением в огнетехнических установках*. М., «*Энергия*», 1970. 400 с. с ил.
- Кнорре Г. Ф. *Топочные процессы*. М., *Госэнергоиздат*, 1951. 262 с. с ил.
- Копытов В. Ф. *Нагрев стали в печах*. *Металлургиздат*, 1955. 264 с. с ил.
- Краткий справочник металлурга*. М., *Внешторгиздат*, 1960.
- Краткий справочник металлурга*. Под ред. В. П. Адриановой. М., *Металлургиздат*, 1965. 370 с. с ил.
- Кржижановский Р. Е. — «*Теплоэнергетика*», 1958, № 1, с. 44—48.
- Кривандин В. А., Марков Б. Л. *Металлургические печи*. М., «*Металлургия*», 1967. 672 с. с ил.
- Кривандин В. А. *Светящееся пламя природного газа*. М., «*Металлургия*», 1973. 136 с. с ил.
- Куколев Г. В., Цейтлин Л. А. — «*Огнеупоры*», 1955, № 1, с. 17—19 с ил.
- Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. *Справочник по теплопередаче*. М., *Госэнергоиздат*, 1959. 414 с. с ил.
- Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. *Гидравлика газожидкостных систем*. М., *Госэнергоиздат*, 1958. 232 с. с ил.
- Кутателадзе С. С. *Теплопередача при конденсации и кипении*. М., *Машгиз*, 1952. 230 с. с ил.
- Кэй Д., Лэби Т. *Справочник физика-экспериментатора*. Пер. с англ. М., ИЛ, 1949. 298 с. с ил.
- Кэмп Д. М. и Френсис К. Б. *Производство и обработка стали*. Пер. с англ. М., *Металлургиздат*, 1948. 730 с. с ил.
- Лавров Н. В. *Физико-химические основы горения и газификации топлива*. М., *Металлургиздат*, 1957. 288 с. с ил.
- Лапушкин С. А. — «*Труды Московского авиационного института*». М., *Оборонгиз*, 1955, № 51, с. 31—35.
- Ларичев В. А. *Качественные стали для современных котельных установок*. М., *Госэнергоиздат*, 1951. 166 с. с ил.
- Лебедев Н. С., Телегин А. С. *Нагревательные печи*. С., *Машгиз*, 1962. 344 с. с ил.
- Лившиц Б. Г. *Физические свойства сплавов*. М., *Металлургиздат*, 1946. 318 с. с ил.
- Линчевский В. П. *Нагревательные печи*. М., *Металлургиздат*, 1948. 691 с. с ил.
- Лифшиц М. А. *Огнеупоры в черной металлургии*. М., *Металлургиздат*, 1960. 267 с. с ил.
- Лыков А. В. *Теория теплопроводности*. М., *Гостеортехиздат*, 1952. 392 с. с ил.
- Лычагин А. С. *Проектирование мартеновских печей*. М., *Металлургиздат*, 1963. 280 с. с ил.
- Мак — Адамс В. *Теплопередача*. Пер. с англ. М., *Металлургиздат*, 1961. 686 с. с ил.
- Мамыкин П. С., Стрелов К. К. *Технология огнеупоров*. М., *Металлургиздат*, 1959. 446 с. с ил.

- Мурон В. Д. Теплопроводность литых сталей. — *Изв. вуз. Черная металлургия*, 1958, № 4, с. 81—91.
- Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 1. М., Машгиз, 1947. 548 с. с ил.
- Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 3. М., Машгиз, 1947. 712 с. с ил.
- Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 4. М., Машгиз, 1947. 428 с. с ил.
- Металлургические печи. Ч. I. Под ред. М. А. Глинкова. М., Металлургиздат, 1963. 440 с. с ил. Авт.: Д. В. Будрин, М. А. Глинков, М. В. Канторов и др.
- Металлургические печи. Ч. II. Под ред. М. А. Глинкова. М., «Металлургия», 1964. 343 с. с ил. Авт., А. И. Ващенко, М. А. Глинков, Б. И. Китаев, Н. Ю. Тайц.
- Металлургическое топливо. Справочник. М., «Металлургия», 1965. 470 с. с ил. Авт.: М. Б. Равич, С. С. Дворин, А. Я. Лепков и др.
- Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Под ред. А. В. Лыкова. М., «Энергия», 1973. 380 с. с ил.
- Авт.: Т. Н. Абраменко, Г. М. Волохов, В. П. Козлов, В. И. Миткалинный, А. Г. Шашков. Струйное движение газов в печах. М., Металлургиздат, 1961. 184 с. с ил.
- Михайленко А. Я., Осокин Н. Е., Грановский Б. Л. Печи для цветной металлургии. М., «Металлургиздат», 1946. 383 с. с ил.
- Михеев М. А. — *«Известия АН СССР. ОТН.»* М., 1947, № 10, с. 1357—1363 с ил.; № 10, с. 1448—1455 с ил.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М., «Энергия», 1973. 319 с. с ил.
- Назаров И. С. Основы теории промышленных печей. М., Металлургиздат, 1941. 314 с. с ил.
- Невский А. С. Лучистый теплообмен в печах и топках. М., «Металлургия», 1971. 438 с. с ил.
- Неймарк Б. Е. — *«Теплоэнергетика»*, 1955, № 9, с. 36—39; 1955, № 3, с. 97—102.
- Немчинский А. Л. Тепловые расчеты термических печей. М., Судпромгиз, 1953. 104 с. с ил.
- Никшов А. С. и др. — *«Вестник машиностроения»*, 1953, № 4, с. 125.
- Норкин Н. Н. — *«Промышленные печи»*. М., Госэнергоиздат, 1953 (ВНИИТЭС, Труды конференции), с. 210—217.
- Огнеупоры. Справочник огнеупорной промышленности. Т. II. М., Госстройиздат, 1939.
- Печи для нагрева металла. Под ред. акад. Н. Н. Доброхотова. М., Машгиз, 1941. 416 с. с ил.
- Равич М. Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. М., Изд-во АН СССР, 1969. 287 с. с ил.
- Расчеты нагревательных печей. Под ред. Н. Ю. Тайца. Киев, «Техніка», 1969. 538 с. с ил. Авт.: С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов и др.
- Рафалович И. М. Тепловые расчеты пламенных печей. М., Металлургиздат, 1949. 256 с. с ил.
- Розенгарт Ю. И. — *«Научные труды Днепропетровского металлургического института»*. Вып. XXXI. М., Металлургиздат, 1954 (Днепропетровский металлургический институт), с. 111—105 с ил.
- Ромadin В. П. Пылеприготовление. М., Госэнергоиздат, 1953, 115 с. с ил.
- Рысин С. А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов. М., Машгиз, 1961. 704 с. с ил.
- Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. Ч. I. Госэнергоиздат, 1958. 288 с. с ил.
- Свенчанский А. Д., Смелянский М. Я. Электрические промышленные печи. Ч. II. М., «Энергия», 1970. 264 с. с ил.
- Семикин И. Д., Аверин С. И. — *«Изв. вузов. Черная металлургия»*, 1962, № 4, с. 140—152; № 8, с. 158—169; № 12, с. 162—173.
- Семикин И. Д., Аверин С. И., Радченко И. И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. М., «Металлургия», 1965. 392 с. с ил.
- Семикин И. Д. — *«Изв. вуз. Черная металлургия»*, 1959, № 3, с. 17—28 с ил.
- Семикин И. Д. Использование природного газа в металлургическом производстве. Днепропетровск, изд. Укр. НТО ЧМ (Днепропетровский металлургический институт), 1957. 42 с. с ил.
- Семикин И. Д., Радченко И. И. — *«Использование природного газа в металлургических печах»*, ГОСИНТИ, 1960, с. 11—22 с ил.
- Семикин И. Д. — *«Научные труды»* (Днепропетровский металлургический институт). вып. XXII, Днепропетровск, изд. ДМИ, 1949, с. 21—53.
- Семикин И. Д. — В кн.: *Расчеты нагревательных печей*. Киев, Укртехиздат, 1958. 422 с. с ил.
- Снярев Г. В., Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М., Оборонгиз, 1953. 210 с. с ил.
- Скворцов А. А., Акименко А. Д., Кузелев М. Я. Нагревательные устройства. М., «Высшая школа», 1965. 443 с. с ил.
- Скворцов А. А. — *«Строительная промышленность»*, 1951, № 10, с. 18—20.

- Соколов Б. Я., Зингер М. Н. Струйные аппараты. М., Госэнергоиздат, 1960. 195 с. с ил.
- Соколов В. Н. Расчеты нагрева металла в металлургических печах. М., Металлургия, 1956. 131 с. с ил.
- Справочник конструктора печей. Под ред. Ю. В. Грум-Гржимайло. ОНТИ НКТП, 1935. 320 с. с ил.
- Справочник конструктора печей прокатного производства. Под ред. В. М. Тымчака. М., «Металлургия», 1970. 991 с. с ил. Авт.: А. Л. Бергауз, В. Л. Гусовский, И. И. Иванова и др.
- Справочник на огнеупорные изделия, материалы и сырье. Под ред. Г. Г. Фельдгандлера. М., Металлургия, 1961. 339 с. с ил.
- Справочник строителя промышленных печей. М., Госстройиздат, 1952. 597 с. с ил.
- Справочник теплотехника предприятий черной металлургии. Т. I. М., Металлургия, 1953. 872 с. с ил.
- Сушкин И. Н. Теплотехника. М., Металлургия, 1960. 728 с. с ил.
- Тайц Н. Ю., Гольдфарб Э. М. — «Труды Днепропетровского НТО». М., Металлургия, 1953. 100 с. с ил.
- Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. И. Методические нагревательные печи. М., Металлургия, 1964. 408 с. с ил.
- Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. М., Металлургия, 1962. 507 с. с ил.
- Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. М., Металлургия, 1958. 404 с. с ил.
- Тепловой расчет котельных агрегатов. М., «Энергия», 1973. 295 с. с ил.
- Теплотехника окискования железорудного сырья. Под ред. С. Г. Братчикова. М., «Металлургия», 1970. 343 с. с ил. Авт.: С. Г. Братчиков, Ю. Л. Берман, Я. Л. Белоцерковский и др.
- Теплотехнические расчеты металлургических печей. Под ред. А. С. Телегина. М., «Металлургия», 1970. 528 с. с ил. Авт.: Б. И. Китаев, Б. Ф. Зобнин, В. Ф. Ратников, А. С. Телегин, и др.
- Теплотехнические расчеты установок силикатной промышленности. М., Госстройиздат, 1951. 489 с. с ил. Авт.: Д. Б. Гинзбург и др.
- Теплофизические свойства веществ. Справочник. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956. 367 с. с ил.
- Термодинамические свойства газов. М., Машгиз, 1953. 373 с. с ил. Авт.: М. П. Вукалович, В. А. Кириллин, С. А. Ремизов и др.
- Техническая энциклопедия. Т. 7. М., ОГИЗ, 1931. 484 с. с ил.
- Тимрот Д. Л. — ЖТФ, 1935, т. V, вып. 6, с. 17—25.
- Топерверх Н. И., Шерман М. Я. Теплотехнические измерительные и регулирующие приборы. М., Металлургия, 1956. 606 с. с ил.
- Троицкий Г. И. Свойства чугуна. М., Металлургия, 1944. 289 с. с ил.
- Тройб С. Г. — В кн.: Металлургические печи. Под ред. М. А. Глинкова. М., Металлургия, 1951, с. 21—148 с ил.
- Тринг Д. Наука о пламенах и печах. М., Металлургия, 1959. 482 с. с ил.
- Тринкс В., Моугиней М. Г. Промышленные печи. Т. I. М., «Металлургия», 1966. 499 с. с ил.
- Умрихин П. В., Кокарев Н. И. Основы скоростной мартеновской плавки. М., Металлургия, 1951. 133 с. с ил.
- Филянд М. А., Семенова Е. И. Свойства редких металлов. М., Металлургия, 1953. 413 с. с ил.
- Франчук А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М., Стройиздат, 1949. 120 с. с ил.
- Фреберг А. К., Бабус С. В. Высокоогнеупорные материалы. М., Металлургия, 1941. 269 с. с ил.
- Фристром Р. М., Вестенберг А. А. Структура пламени. М. «Металлургия», 1969. 380 с. с ил.
- Черная Р. — «Холодильная техника», 1948, № 4, с. 28—31.
- Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов. 2-е изд., дополн. и перераб. М., Машгиз, 1962. 247 с. с ил.
- Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959. 356 с. с ил.
- Чудновский А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. М., Гостехтеоретиздат, 1954. 324 с. с ил.
- Шак А. Промышленная теплопередача. Пер. с нем. М., Металлургия, 1961. 452 с. с ил.
- Шевельков В. Л. Теплофизические характеристики изоляционных материалов. М., Госэнергоиздат, 1958. 96 с. с ил.
- Шишаков Н. В. Основы производства горючих газов. М., Госэнергоиздат, 1948. 479 с. с ил.
- Шмыков А. А. Справочник термиста. М., Машгиз, 1961. 287 с. с ил.
- Шорин С. Н., Артюхов И. М. Газоснабжение. Изд. Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1956. 89 с. с ил.
- Шорин С. Н. Теплопередача. М., «Высшая школа», 1964. 490 с. с ил.

- Шекин Р. В. и др. Справочник по теплоснабжению и вентиляции в гражданском строительстве. Киев, Госстройиздат УССР, 1959. 395 с. с ил.
- Эккерт Э. Р. Введение в теорию тепло- и массообмена. М., Госэнергоиздат, 1957. 280 с. с ил.
- Энциклопедия металлофизики. Т. I. ОНТИ, 1937. 420 с. с ил.
- Янкелев Л. Ф. Термоизоляция и огнеупорная футеровка в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1947. 301 с. с ил.
- Янкелев А. Ф. — «Энергохозяйство за рубежом», 1957, № 1, с. 23—28.
- Anselm W., Koch A. Brenntechnik mit Sauerstoff. Schriftenreihe Steine u. Erden. Berlin, 1944, B. 7.
- Braune H., Linke R. L. f. Phys. Chem., 1930, (A), Bd 148, S. 195.
- Chemical Engineering, 1953, v. 60, № 5, p. 300—312.
- Cude A. L. — «J. of the Iron and Steel», Institute Now., 1953, Marmh, p. 271—280.
- Donaldson J. W. Special. Report. 1932. v. 2. Rep. № 4, p. 112. Iron and Steel Inst.
- Essre H., Ensterbrok H. — «Arch. für das Eisenhüttenwesen», 1941, Bd. 7, S. 284—295.
- Hennig F. Wärmetechnische Richtwerte. Berlin, 1938.
- Special Report. Iron and Steel Institute, Rep. № 2, 1939, v. 24, p. 173—181.
- Jung D., Schmick H. L. f. Phys. Chem., 1930, (B), Bd 7, S. 130.
- «Journ. of the Iron and Steel Institute», 1946, v. 154, № 2, p. 83—121.
- Kazantsev E. I., Lorange F. — «Revue Universelle des Mines», Serie 9. 1964, v. XX, № 2, Febr., p. 1—18.
- Kazantsev E. I. Sbornik vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě, Ročník XIV. 1968, číslo 7. Řada Hutnická články 508. IV Hutnická vědecká konference, p. 161—178.
- Kingery R. — «Journal Am. Ceramic Soc.», 1955, v. 38, № 7, p.
- Klinchardt H. — «Annalen d. Physik», 1927, № 4, p. 84.
- Licht W. — «Journ. of Phys. Chem.», 1944, v. 48, № 1, p. 39—48.
- Mark L. S. Mechanical Engineers Handbook, 5-th ed. Mc. Grow—Hill, N.—Y., 1954.
- McAdams W. H. Heat Transmission. N. — Y., 1942.
- Morawef. — «Giesserei», 1930, H. O, S. 234—236.
- Norris R., Steid D. — «Trans. ASME», 1940, № 6, p. 75—90.
- Shomate H., Naylor B. — «Journ. Am. Chem. Soc.», 1945, v. 67, № 1, p.
- Tammann G. u. Bandel G. — «Archiv für das Eisenhüttenwesen», 1934, Bd 7, № 10, S. 571—578.
- Teyssler I., Jirásek V. — «Priloha Casopisi Energetika», čís. 6, 1954.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПЕРЕВОД НЕКОТОРЫХ ВЕЛИЧИН ИЗ ПРЕЖНИХ СИСТЕМ В МЕЖДУНАРОДНУЮ СИСТЕМУ ЕДИНИЦ СИ

(старая \times коэффициент = новая; новая: коэффициент = старая)

Наименование величины	Обозначение	Размерность		Соотношение	Для перевода в систему СИ данные в старых таблицах следует умножить на
		прежние системы	СИ		
Энергия и работа	A, E	$\text{кг} \cdot \text{м} \cdot (\text{кгс} \cdot \text{м})$	$\text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$	$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,80665 \text{ Дж}$	$\sim 9,81$
Энтальпия (теплосодержание)	i, I, H	ккал/кг	кДж/кг		
Теплота плавления	Q, q	ккал/м ³	кДж/м ³	$1 \text{ ккал} = 4,1868 \text{ Дж}$	4,1868
Теплота сгорания	Q_H^P	ккал/(кг \cdot $^{\circ}\text{C}$)	кДж/(кг \cdot $^{\circ}\text{C}$)		
Теплоемкость	c	ккал/(м ³ \cdot К)	кДж/(м ³ \cdot $^{\circ}\text{C}$)	$1 \text{ ккал} = 4,1868 \text{ Дж}$	4,1868
Энтропия	S	ккал/(м \cdot ч \cdot $^{\circ}\text{C}$)	Вт/(м \cdot $^{\circ}\text{C}$)		
Коэффициент теплопроводности	λ	ккал/(м \cdot ч \cdot $^{\circ}\text{C}$)	Вт/(м \cdot $^{\circ}\text{C}$)	$1 \text{ ккал/ч} = 1,163 \text{ Вт}$	1,163

Наименование величины	Обозначение	Размерность		Соотношение	Для перевода в систему СИ данные в старых таблицах следует умножить на
		прежние системы	СИ		
Коэффициенты: теплопередачи теплоотдачи	k, α	$\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$	$1 \text{ ккал}/\text{ч} = 1,163 \text{ Вт}$	1,163
Коэффициент излучения	C, σ	$\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{K}^4)$	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{K}^4) = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$	$1 \text{ ккал}/\text{ч} = 1,163 \text{ Вт}$	1,163
Давление	p, h	бар $\text{кгс}/\text{м}^2 = 1 \text{ мм H}_2\text{O} = 1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ мм рт. ст.}$ $\text{кгс}/\text{см}^2 = \text{ат}$	$1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ па (паскаль)}$ $1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па}$ $1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па}$ $1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па}$	$1 \text{ бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^2$ $1 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 9,80665 \text{ Н}/\text{м}^2$ $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,332 \text{ Н}/\text{м}^2$ $1 \text{ ат} = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^2$ $1 \text{ ат} = 98 \text{ кН}/\text{м}^2$ $1 \text{ ат} = 0,098 \text{ МН}/\text{м}^2$	10^5 9,80665 133,332 98·10 ³ 98,066 ~0,1
Напряжение (механическое)	σ	$\text{кгс}/\text{мм}^2$	$1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па}$	$1 \text{ кгс}/\text{мм}^2 = 0,98 \cdot 10^7 \text{ Н}/\text{м}^2$ $1 \text{ кгс}/\text{мм}^2 = 9,8 \text{ МН}/\text{м}^2$	$9,8 \cdot 10^6$ 9,8
Поверхностное натяжение	σ	$\text{эрг}/\text{см}^2$	$\text{Дж}/\text{м}^2$	$1 \text{ эрг}/\text{см}^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/\text{м}^2$ или $1 \text{ мДж}/\text{м}^2$	10^{-3}
Вязкость	η	$\text{кгс} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ $\text{гс}/(\text{см} \cdot \text{с}) = \text{пуаз}$ $\text{кгс}/(\text{м} \cdot \text{с})$	$\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	$1 \text{ кгс} \cdot \text{с}/\text{м}^2 = 9,80665 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ $1 \text{ гс}/(\text{см} \cdot \text{с}) = 0,1 (\text{Н} \cdot \text{с})/\text{м}^2$ $1 \text{ кгс}/(\text{м} \cdot \text{с}) = 1 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	9,80665 0,1 1,0

Приставки для образования кратных и дольных единиц

Тера ТТ	10^{12}	Гекто г	h	10^2	Микро	мкм	μ	10^{-6}
Гига ГГ	10^9	Дека да	da	10^1	Нано	н	n	10^{-9}
Мега ММ	10^6	Деци д	d	10^{-1}	Пико	п	p	10^{-12}
Кило кк	10^3	Санги с	s	10^{-2}	Фемто	ф	f	10^{-15}
		илли м	m	10^{-3}	Атто	а	a	10^{-18}

ПЕРЕВОДНЫЕ МНОЖИТЕЛИ ДЛЯ ПЕРЕХОДА ОТ НЕКОТОРЫХ АНГЛИЙСКИХ И АМЕРИКАНСКИХ ЕДИНИЦ К ЕДИНИЦАМ СИСТЕМЫ СИ

Наименование единицы	Сокращенное обозначение	Значение переводной единицы в единицах системы СИ
Ярд	yd	0,9144 м (точно)
Фут	ft	0,3048 м (точно)
Дюйм	in	0,0254 м (точно)
Миля	mile	1609,344 м (точно) \approx 1,609 км
Квадратный дюйм	in ²	6,4516 · 10 ⁻⁴ м ² (точно)
Квадратный фут	ft ²	0,0929030 м ²
Квадратный ярд	yd ²	0,836127 м ²
Кубический ярд	yd ³	0,764555 м ³
Кубический фут	ft ³	0,0283168 м ³
Кубический дюйм	in ³	16,3871 · 10 ⁻⁶ м ³
Кубический фут на фунт-моль		0,062428 м ³ /кмоль
Фут в секунду (на секунду в квадрате)	ft/s	0,3048 м/с (точно)
Фунт (торговый)	lb	0,45359237 кг
Унция	oz	28,3495 · 10 ⁻³ кг
Тонна (Брит)	ton	1016,05 кг
Аптекарская унция	oz apoth	31,1035 · 10 ⁻³ кг
Фунт на кубический фут	lb/ft ³	16,0185 кг/м ³
Фунт на кубический дюйм	lb/in ³	27680 кг/м ³
Фунт-сила	lbf	4,44822 Н
Тонна-сила	tonf	9964,02 Н
Фунт-сила-фут	lbf · ft	1,35582 Н · м
Фунт-квадратный дюйм	lb · in ²	2,9264 · 10 ⁻⁴ кг · м ²
Фунт-сила на квадратный фут	lbf/ft ²	1,48816 Н/м ²
Фунт-сила на квадратный дюйм	lbf/in ²	6894,76 Н/м ²
Фут вод. ст.	ft H ₂ O	2989,07 Н/м ²
Дюйм вод. ст.	in H ₂ O	249,089 Н/м ²
Дюйм рт. ст.	in Hg	3386,39 Н/м ²
Фунт-сила-фут в 1 с	lbf · ft/s	1,35582 Вт
Квадратный фут в 1 с	ft ² /s	0,092903 м ² /с
Квадратный фут в 1 ч	ft ² /h	25,806 · 10 ⁻⁶ м ² /с
Дюйм квадратный в 1 ч	in ² /h	17,92111 · 10 ⁻⁸ м ² /с
Дюйм квадратный в 1 с	in ² /s	6,4516 · 10 ⁻⁴ м ² /с (точно)
Фунт-сила-секунда на 1 квадратный фут	lbf/ft ²	47,8803 Н · с/м ²
Британская тепловая единица	Btu	1055,06 Дж
Средняя британская тепловая единица	Btu _{mean}	1055,8 Дж
Термия	th	4,2 МДж
Британская тепловая единица в 1 ч	Btu/h	0,293071 Вт
Британская тепловая единица в 1 с	Btu/s	1055,06 Вт
Тепловая британская единица на 1 фунт	Btu/lb	2326 Дж/кг (точно)
Британская тепловая единица на 1 град Фаренгейта	Btu/deg F	1,89911 · 10 ³ Дж/К
Британская тепловая единица на 1 фунт-град Фаренгейта	Btu/(lb · deg F)	4,1868 · 10 ³ Дж/(кг · К) (точно)
Британская тепловая единица на квадратный дюйм-секунду	Btu/(in ² · s)	1,63535 · 10 ⁶ Вт/м ²

Наименование единицы	Сокращенное обозначение	Значение переводной единицы в единицах системы СИ
Британская тепловая единица на квадратный фут·ч	Btu/(ft ² ·h)	3,15461 Вт/м ²
Британская тепловая единица на квадратный фут·ч·град Фаренгейта	Btu/(ft ² ·h·deg F)	5,6783 Вт/(м ² ·К)
Британская тепловая единица на 1 квадратный дюйм·с·град Фаренгейта	Btu/(in ² ·s·deg F)	2,94363·10 ⁶ Вт/(м ² ·К)
Британская тепловая единица на 1 фут·ч·град Фаренгейта	Btu/(ft·h·deg F)	1,730741 Вт/(м·К)
Британская тепловая единица на 1 дюйм·с·град Фаренгейта	Btu/(in·s·deg F)	7,47681·10 ⁴ Вт/(м·К)
Градус Фаренгейта на 1 фут	deg F/ft	1,82269К/м
Градус Фаренгейта на 1 дюйм	deg F/in	21,8723К/м

Евгений Иванович КАЗАНЦЕВ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ

*Справочное руководство для расчетов
и проектирования*

Редактор издательства **М. Р. Лановская**
Художественный редактор **Г. А. Жегин**
Технический редактор **Е. Б. Вайнштейн**
Корректоры **В. Б. Левин** и **Е. В. Якиманская**
Переплет художника **А. Беднарского**

Сдано в набор 19/XI 1974 г. Подписано в печать 22/VII 1975 г.
Т-13329 Формат бумаги 70×108¹/₁₆ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 32,20 Уч.-изд. л. 31,58
Тираж 17 000 экз. Заказ № 583 Изд. № 2701 Цена 1 р. 25 к.

Издательство «Металлургия», 119034, Москва, Г-34,
2-й Обыденский пер., д. 14

Подольская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Подольск, ул. Кирова, 25

Периоды	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА										VII		VIII					
	I										1	H	2	He				
1	{H}										1,00	ВОДОРОД	4,0026	ГЕЛИЙ				
2	3 Li 6,939 ЛИТИЙ	4 Be 9,0122 БЕРИЛЛИЙ	5 B 10,811 БОР	6 C 12,0115 УГЛЕРОД	7 N 14,0067 АЗОТ	8 O 15,9994 КИСЛОРОД	9 F 18,9984 ФТОР	10 Ne 20,1797 НЕОН	11 Na 22,9898 НАТРИЙ	12 Mg 24,305 МАГНИЙ	13 Al 26,9815 АЛЮМИНИЙ	14 Si 28,086 КРЕМНИЙ	15 P 30,9738 ФОСФОР	16 S 32,064 СЕРА	17 Cl 35,453 ХЛОР	18 Ar 39,948 АРГОН		
3	19 K 39,102 КАЛИЙ	20 Ca 40,08 КАЛЬЦИЙ	21 Sc 44,956 СКАНДИЙ	22 Ti 47,90 ТИТАН	23 V 50,942 ВАНАДИЙ	24 Cr 51,996 ХРОМ	25 Mn 54,9380 МАРГАНЕЦ	26 Fe 55,847 ЖЕЛЕЗО	27 Co 58,9332 КОБАЛЬТ	28 Ni 58,71 НИКЕЛЬ	29 Cu 63,546 МЕДЬ	30 Zn 65,37 ЦИНК	31 Ga 69,72 ГАЛЛИЙ	32 Ge 72,59 ГЕРМАНИЙ	33 As 74,9216 МЫШЬЯК	34 Se 78,96 СЕЛЕН	35 Br 79,904 БРОМ	36 Kr 83,80 КРИПТОН
4	37 Rb 85,47 РУБИДИЙ	38 Sr 87,62 СТРОНЦИЙ	39 Y 88,905 ИТРИЙ	40 Zr 91,22 ЦИРКОНИЙ	41 Nb 92,906 НИОБИЙ	42 Mo 95,94 МОЛИБДЕН	43 Tc [99]* ТЕХНЕЦИЙ	44 Ru 101,07 РУТЕНИЙ	45 Rh 102,905 РОДИЙ	46 Pd 106,4 ПАЛАДИЙ	47 Ag 107,868 СЕРЕБРО	48 Cd 112,40 КАДМИЙ	49 In 114,82 ИНДИЙ	50 Sn 118,69 ОЛОВО	51 Sb 121,75 СУРЬМА	52 Te 127,60 ТЕЛЛУР	53 I 126,9044 ИОД	54 Xe 131,30 КСЕНОН
5	55 Cs 132,905 ЦЕЗИЙ	56 Ba 137,34 БАРИЙ	57 La * 138,91 ЛАНТАН	72 Hf 178,49 ГАФНИЙ	73 Ta 180,948 ТАНТАЛ	74 W 183,85 ВОЛЬФРАМ	75 Re 186,2 РЕНИЙ	76 Os 190,2 ОСМИЙ	77 Ir 192,2 ИРИДИЙ	78 Pt 195,09 ПЛАТИНА	79 Au 196,967 ЗОЛОТО	80 Hg 200,59 РУТУТЬ	81 Tl 204,37 ТАЛЛИЙ	82 Pb 207,19 СВИНЕЦ	83 Bi 208,980 ВИСМУТ	84 Po [210]* ПОЛОНИЙ	85 At [210] АСТАТ	86 Rn [222] РАДОН
6	87 Fr [223] ФРАНЦИЙ	88 Ra [226] РАДИЙ	89 Ac ** [227] АКТИНИЙ	104 Ku [260] КУРЧАТОВИЙ	105 [260] [260]	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Li 3 6,939 ЛИТИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Hf 72 178,49 ГАФНИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Ta 73 180,948 ТАНТАЛ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> W 74 183,85 ВОЛЬФРАМ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Re 75 186,2 РЕНИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Os 76 190,2 ОСМИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Ir 77 192,2 ИРИДИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Pt 78 195,09 ПЛАТИНА </div> </div> <p>Обозначение элемента</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Li 3 6,939 ЛИТИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Hf 72 178,49 ГАФНИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Ta 73 180,948 ТАНТАЛ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> W 74 183,85 ВОЛЬФРАМ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Re 75 186,2 РЕНИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Os 76 190,2 ОСМИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Ir 77 192,2 ИРИДИЙ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Pt 78 195,09 ПЛАТИНА </div> </div> <p>Атомный номер Атомный вес</p> <p>В квадратных скобках приведены массовые числа наиболее устойчивых или лучше изученных* изотопов</p>												
7											s-элементы		p-элементы		d-элементы		f-элементы	

* ЛАНТАНОИДЫ

58 Ce 140,12 ЦЕРИЙ	59 Pr 140,907 ПРАЗЕОДИМ	60 Nd 144,24 НЕОДИМ	61 Pm [147]* ПРОМЕТИЙ	62 Sm 150,35 САМАРИЙ	63 Eu 151,96 ЕВРОПИЙ	64 Gd 157,25 ГАДОЛИНИЙ	65 Tb 158,924 ТЕРБИЙ	66 Dy 162,50 ДИСПРОЗИЙ	67 Ho 164,930 ГОЛЬМИЙ	68 Er 167,26 ЭРБИЙ	69 Tm 168,934 ТУЛИЙ	70 Yb 173,04 ИТТЕРБИЙ	71 Lu 174,97 ЛЮТЕЦИЙ
-----------------------------	----------------------------------	------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	------------------------------	--------------------------------	-------------------------------

** АКТИНОИДЫ

90 Th 232,038 ТОРИЙ	91 Pa [231] ПРОТАКТИНИЙ	92 U 238,03 УРАН	93 Np [237] НЕПТУНИЙ	94 Pu [244] ПЛУТОНИЙ	95 Am [243] АМЕРИЦИЙ	96 Cm [247] КЮРИЙ	97 Bk [247] БЕРКЛИЙ	98 Cf [252]* КАЛИФОРНИЙ	99 Es [254] ЭЙНШТЕЙНИЙ	100 Fm [257] ФЕРМИЙ	101 Md [257] МЕНДЕЛЕВИЙ	102 (No) [255] (НОБЕЛИЙ)	103 (Lr) [256] (ЛОУРЕНСИЙ)
------------------------------	----------------------------------	---------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------